

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299727

Lastkraftfahrzeuge

Von **Oschmann**
Major im Kriegsministerium



F.N. 28 042



Mit 9 Bildern im Text

Berlin 1908

Ernst Siegfried Mittler und Sohn
Königliche Hofbuchhandlung, Kochstr. 68—71

XXX
225



II 32258

Sonderabdruck aus der
„Kriegstechnischen Zeitschrift“ 1908, Heft 3—7.

Alle Rechte aus dem Gesetze vom 19. Juni 1901
sowie das Übersetzungsrecht sind vorbehalten.

Akc. Nr. 5099 / 51

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	5
I. Die Beziehungen zwischen Straße und Fahrzeug	5
A. Pferdebetrieb	6
1. Bewegung	6
2. Bewegungswiderstände	7
3. Schiefe Ebene.	7
4. Reibung	8
5. Reibungskoeffizient.	10
6. Hohe Räder	11
7. Anfahren	12
8. Einfluß der Steigungen	14
9. Summe der Bewegungswiderstände	15
B. Mechanischer Betrieb.	
1. Allgemeines	15
2. Zulässiger Raddruck auf Straßen.	17
3. Vierräderantrieb	19
4. Einfluß der Witterung	21
Rechenbeispiele	21
II. Die verschiedenen Systeme von Lastkraftfahrzeugen	23
Einteilung	23
A. Antrieb durch Wärmekraftmaschinen	24
1. Dampfmaschinen	24
a. Feste Heizstoffe	24
b. Flüssige Heizstoffe	25
c. Beurteilung	25
2. Verbrennungsmotoren.	
a. Allgemeines	26
b. Arbeitsweise.	27
c. Beurteilung	28
B. Elektrischer Antrieb.	
1. Allgemeines	30
2. Gleislose elektrische Bahnen	30
3. Fahrzeuge mit Akkumulatorbetrieb.	31
4. Das gemischte System	31

	Seite
III. Leistungsfähigkeit.	
A. Allgemeines	33
B. Faktoren der Massenförderung	33
Rechenbeispiele	34
C. Kurvenwiderstand.	
1. Züge	41
a. Züge vom Schlepssystem (Dampfzüge)	41
b. Züge mit elektrischer Kraftübertragung	43
c. Vergleich beider Systeme	44
2. Die anderen Systeme	45
D. Nutzlast.	
1. Allgemeines	45
2. Nutzlastkoeffizient	46
a. Lokomotivzüge	46
b. Lastkraftwagen und »leichte Züge«	49
c. Züge mit elektrischer Kraftübertragung	52
E. Allgemeiner Ausdruck für die Leistungsfähigkeit	52
F. Motorstärke	53
1. Lastkraftwagen	53
2. Dampfzug	55
3. Elektrischer Zug	55
IV. Wirtschaftlichkeit	56
V. Allgemeines Ergebnis	58



Einleitung.

In zahlreichen Betrieben, die dauernd oder periodisch große Transportleistungen zu bewältigen haben, hat man sich in den letzten Jahren mit der Frage beschäftigt, ob es bei dem gegenwärtigen Stande der Technik wohl schon an der Zeit sei, an Stelle des Pferdebetriebes den Kraftwagenbetrieb einzuführen und welche Art von Lastkraftwagen man zu wählen haben würde. Auf solche Fragen kann natürlich eine allgemein gültige Antwort überhaupt nicht gegeben werden; vielmehr ist jeder einzelne Fall zu prüfen. Die Aufgabe, solche Prüfungen vorzunehmen, wird in der nächsten Zukunft, in welcher eine lebhaftere Bewegung für den Übergang zum Kraftfahrbetriebe zu erwarten ist, manchen beschäftigen. Die Faktoren, die bei einer solchen Prüfung zu berücksichtigen sind, müssen aber jedem, der an eine so einschneidende Neuerung mit eigenem Urtheil herantreten will, bekannt sein; durch die verhältnismäßig sehr einfachen Rechnungen, die dabei nötig sind, kann sich jeder Landwirt, Spediteur usw. selbst dies Urtheil bilden. Hierzu den Interessenten die Mittel an die Hand zu geben und den vielfach verbreiteten irrigen Anschauungen entgegenzutreten, ist der Zweck der nachstehenden Erörterungen.

I. Die Beziehungen zwischen Straße und Fahrzeug.

Wer zum Lastkraftfahrbetriebe übergehen will, hat in erster Linie zu prüfen, welcher Art die Straßen sind, auf denen seine Lastkraftwagen fahren sollen. Unsere Straßen sind für den Fuhrwerksbetrieb mit Pferden gebaut und passen recht schlecht für den mechanischen Betrieb, namentlich aber nicht für jedes beliebige System von Lastkraftwagen. Hat die Straße doch auch auf den Pferdebetrieb, dem sie allgemein dienen soll, einen gewissen Einfluß insofern, als sich nach ihr die Art des Anspanns, den sich der Fuhrunternehmer zu halten hat, und häufig auch die Bauart der Fahrzeuge richten muß; in gebirgigem Gelände, wie im Westen unseres Vaterlandes, wo die Straßen zwar meist gut und fest gebaut sind, aber starke und anhaltende Steigungen haben, müssen schwere Pferde eingestellt und Wagen von besonderer, kräftiger Bauart

verwendet werden; in den östlichen Provinzen dagegen, wo das Kunststraßennetz weniger dicht ist, also vielfach ungenügend befestigte oder gar tief sandige Wege benutzt werden müssen, hat man sehr leicht gebaute Fahrzeuge eingeführt, die nur geringe Last aufnehmen, aber mit zwei bis vier kleinen leichten Pferden in flottem Tempo gefahren werden können.

A. Pferdebetrieb.

Verweilen wir kurz beim Pferdebetrieb, um später den Unterschied des mechanischen Betriebes diesem gegenüber zu verstehen.

Das Fahrzeug wird hier durch eine von außen her an den Zugsträngen wirkende Kraft gezogen; es hat also, sobald es einmal in Bewegung gesetzt ist, lediglich, indem es die Bewegung fortsetzt, seine Räder auf der Straße abzurollen (wir werden später sehen, daß die Räder eines Kraftwagens zum Teil eine ganz andere Funktion haben).

Daß das erste »Inbewegungsetzen«, der Übergang aus dem Zustand der Ruhe in den der Bewegung, das »Anfahren«, wie man es nennt, viel schwerer ist als das »Inbeweugenerhalten«, das weiß jeder aus der Praxis. Diese Erscheinung hat verschiedene Gründe, auf die später eingegangen werden soll; vorerst müssen wir uns den einfachen Fall klar machen: das Rollen des einmal in Bewegung gesetzten Fahrzeuges, die Kräfte, die zur Aufrechterhaltung dieser rollenden Bewegung nötig sind, oder die Widerstände, die diese Bewegung zu hemmen suchen.

1. Bewegung.

Erinnern wir uns zu diesem Zweck der einfachen Gesetze der Bewegung. Wir haben zunächst bei dem Begriff »Bewegung« zu unterscheiden zwischen »gleichförmiger« Bewegung, wobei in derselben Zeit immer dieselbe Strecke zurückgelegt wird, und der diese Bedingung nicht erfüllenden »ungleichförmigen« Bewegung, die entweder »beschleunigt« ist (falls die in der Zeiteinheit zurückgelegten Strecken zunehmen) oder »verzögert« (falls diese Strecken abnehmen).

Wir sehen, daß bei der Bewegung zwei Begriffe eine Rolle spielen: die Zeiteinheit und der Weg, der in dieser Zeit zurückgelegt wird. Man nennt die Wegstrecke, die auf die Zeiteinheit (Sekunde) entfällt, die »Geschwindigkeit«; wenn ein bewegter Körper in einer Sekunde einen Weg von 2 m zurücklegt, so sagen wir: er hat eine Geschwindigkeit von 2 m; wir rechnen aber bei Fahrzeugen meist nicht nach Metern und nicht nach Sekunden, sondern drücken die »Geschwindigkeit« hier aus durch die Anzahl von Kilometern, die das Fahrzeug in einer Stunde zurücklegt. Ein Fahrzeug, das 2 m oder 0,002 km in der Sekunde fährt, legt in 3600 Sekunden (1 Stunde = 3600 Sekunden) einen Weg von $0,002 \times 3600 = 7,2$ km zurück.

Nun besitzt jeder Körper die Eigenschaft, in seinem Bewegungszustand zu verharren, wenn nicht äußere Kräfte auf ihn einwirken. Diese Eigenschaft heißt Beharrungsvermögen oder Trägheit. Ein in gleichförmiger Bewegung befindliches Fahrzeug müßte also eigentlich von selbst in dieser Bewegung bleiben. Die Erfahrung lehrt uns, daß dies nicht der Fall ist, und läßt uns somit darauf schließen, daß Kräfte tätig sein müssen, welche die Trägheit des bewegten Fahrzeuges beeinflussen. Wenn wir auf völlig ebener Fahrbahn ein Fahrzeug, dem eine bestimmte

Geschwindigkeit erteilt ist, sich selbst überlassen, so geht seine Bewegung sofort in eine »verzögerte« über, d. h., die Geschwindigkeit nimmt immer mehr ab, bis sie $= 0$ wird, also Stillstand des Fahrzeugs eintritt. Es wirken also der Bewegung des Fahrzeuges Kräfte, »Bewegungswiderstände«, entgegen.

2. Bewegungswiderstände.

Solche Widerstände sind: die »Reibung«, der »Steigungs-« und der »Luftwiderstand«. Der letztere kann bei schnellfahrenden Fahrzeugen sehr bedeutend sein, bei den Fahrzeugen aber, um die es sich bei unseren Betrachtungen handelt, ist er, abgesehen von Gegenwind, so gering, daß er außer Betracht bleiben kann. Es bleiben also die Reibung und der Steigungswiderstand.

Reibung tritt bei der Bewegung eines Fahrzeuges auf:

an den Berührungsflächen der Achsschenkel mit dem Innern der Radnaben und

bei der Berührung der Radkränze mit der Fahrbahn.

Die Achsschenkelreibung sucht man möglichst zu verringern, indem man die Achsschenkel »schmiert«. Infolgedessen tritt ihr Einfluß gegenüber dem der Reibung der Räder auf der Fahrbahn so zurück, daß sie hier ebenfalls vernachlässigt werden kann.

Welche Widerstände entstehen nun bei Bewegung eines Fahrzeuges auf der Fahrbahn?

Um sich hierüber Klarheit zu verschaffen, ist es gut, auf die Gesetze zurückzugreifen, die für das Gleichgewicht auf der schiefen Ebene gelten.

3. Schiefe Ebene.

Wenn auf einer solchen schiefen Ebene (Bild 1), die gegen die Horizontale einen Neigungswinkel α haben möge, ein Körper von dem Gewicht Q liegt, so wirkt dies Q , der Schwerkraft folgend, senkrecht abwärts, d. h. lotrecht zur Horizontalebene, läßt sich also wegen der geneigten Unterlage in zwei Seitenkräfte zerlegen (nach dem Parallelogramm der Kräfte); eine dieser Seitenkräfte, und zwar bei den als Fahrbahn vorkommenden geringen Neigungen die weitaus größere, Q' , wirkt als Druck auf die schiefe Ebene; die andere, kleinere, Q'' , zieht den Körper in der Richtung der schiefen Ebene abwärts. Bleibt der

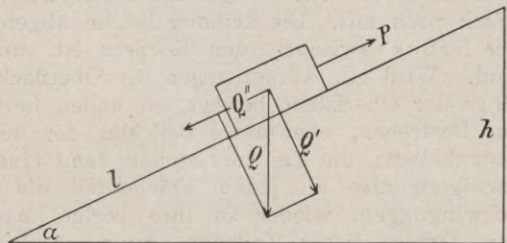


Bild 1.

Körper, dieser Kraft nicht folgend, auf seiner Stelle liegen, so ist das nur dadurch erklärbar, daß eine Kraft (P) vorhanden ist, die der Kraft Q'' entgegengesetzt gerichtet und mindestens gleich ist, also sie aufhebt. Man kann den zahlenmäßigen Wert dieser Kraft P ermitteln. Es schließen nämlich Q und Q' einen Winkel ein, der dem Neigungswinkel der schiefen Ebene (α) gleich ist (weil die Schenkel beider Winkel aufeinander senkrecht stehen); demnach sind die betreffenden Dreiecke »ähn-

lich«, und es ist unter anderem $Q'' : Q = h : l$; Q'' ist aber gleich P , also ist $P : Q = h : l$ oder P muß sein $= \frac{Q \cdot h}{l}$. Da $\frac{h}{l} = \sin \alpha$, ergibt sich $P = Q \cdot \sin \alpha$. In kleinem Maßstabe, bei Versuchen im Laboratorium, kann man ermitteln, für welchen Wert des Winkels α die Gleichung bei gegebenen Werten von P und Q gilt; wird Winkel α allmählich vergrößert, so muß bei einem bestimmten Höchstwert dieses Winkels der Körper Q zu gleiten beginnen.

Das für das Gleichgewicht auf der schiefen Ebene ermittelte Gesetz $P = Q \cdot \sin \alpha$ können wir auch ausdrücken: die Kraft, die nötig ist, um das Herabgleiten einer Last auf einer geneigten Fläche zu verhindern, ist gleich dem Produkt: »Last mal Sinus des Neigungswinkels« oder: »diese Kraft verhält sich zur Last wie die Höhe zur Länge der schiefen Ebene«; ist diese Höhe verhältnismäßig groß, also auch der Neigungswinkel groß, so ist das Bestreben zum Herabgleiten ebenfalls sehr groß; es muß dann auch die Kraft, die diesem Herabgleiten das Gleichgewicht halten soll, groß werden.

So sorgfältig man aber auch einen solchen Versuch ausführen würde, durch allmähliche Vergrößerung des Neigungswinkels den genauen Wert der Kraft zu finden, die der gleitenden Last gerade das Gleichgewicht hält, so würde doch immer ein Fehler in der Rechnung bleiben; das Verhalten der Körper gegenüber den Gesetzen der Bewegung auf der schiefen Ebene erleidet nämlich eine Änderung durch die »Reibung«, auf die wir nun wieder zurückkommen.

4. Reibung.

Diese Reibung findet zwischen dem gleitenden Körper und der Unterlage statt; sie wird dem allgemeinen Gefühl nach auf die »Rauhigkeit« der Berührungsflächen zurückgeführt; nach Reiss ist sie die Kraft, die an den Berührungsflächen zweier Körper auftritt, wenn zwischen beiden Körpern eine relative Bewegung oder das Bestreben nach einer solchen vorhanden ist. Sie hat einen verwickelten Ursprung: die Adhäsion der sich berührenden Oberflächenteilchen, die Festigkeit und Elastizität der hervorragenden Teilchen; vielleicht wirkt auch der Luftdruck noch mit. Die Reibung ist im allgemeinen um so größer, je größer der Druck zwischen den Körpern ist und je rauher ihre Oberflächen sind. Wird ein Körper gegen die Oberfläche eines andern gedrückt und längs der Oberfläche bewegt, so haben hervorragende Teilchen des einen das Bestreben, ebensolche Teilchen des andern vermöge der »Adhäsion« festzuhalten; die Teilchen ziehen dann einander, sich festhaltend, nach, verzögern also an jedem Flächenteil die Bewegung und kehren, nach Schwingungen, wieder in ihre vorige Lage zurück; auch werden durch den Druck dieser Teilchen gegeneinander die »Hervorragungen« umgebogen und kehren dann, vermöge der Elastizität, durch Schwingungen zurück; es entsteht Schall und Wärme; solche Teilchen werden unter Umständen abgebrochen und zerrieben (Schleifen!); ferner kann die Erscheinung eintreten, daß der obere bewegte Körper angehoben werden muß, damit seine hervorragenden Teilchen aus den Zwischenräumen des unteren Körpers herausgehoben werden können.

Man hat über die Reibung die folgenden Sätze aufgestellt:

1. Die Reibung (also auch die Kraft zu ihrer Überwindung) ist direkt proportional dem Druck, mit dem die beiden Körper auf-

- einander gepreßt werden, d. h. sie kann immer ihrem Zahlenwert nach als ein Bruchteil dieses Druckes ausgedrückt werden. Dieser Bruchteil, der auch zur Überwindung der Reibung nötig ist, wird der »Reibungskoeffizient« genannt (f). Wenn also der Druck gleich Q ist, so ist die Reibung gleich $f \cdot Q$.
2. Die Reibung ist unabhängig von der Größe der sich berührenden Flächen.
 3. Die Reibung ist in der Ruhe größer als in der Bewegung.
 4. Der Reibungskoeffizient ist um so kleiner, je geringer die Rauigkeit der berührten Oberflächen ist (mit anderen Worten: je glatter die Reibflächen sind); dabei spielt das Material der Reibflächen eine Rolle; daß durch Schmierung der Oberflächen die Glätte erhöht werden kann, ist schon erwähnt worden.
 5. Die »gleitende« Reibung ist größer als die »rollende« Reibung. Z. B. ist der Koeffizient bei der gleitenden Reibung von Holz auf Holz $= \frac{1}{3}$ (des Druckes), für Metall auf Metall (trocken) $= \frac{1}{6}$; wenn aber die Flächen geschmiert sind (s. o.: die Achschenkeln) nur $= \frac{1}{14}$. Bei der rollenden Reibung sinkt der Koeffizient auf $\frac{1}{50}$, wohl aus dem Grunde, weil die Hervorragungen der geriebenen Flächen durch die Rollbewegung selbst aus den Lücken herausgehoben werden. Deshalb muß man, wenn man große Lasten fortzubewegen hat, die gleitende Reibung vermeiden; man pflegt sie durch Walzen in eine rollende Reibung zu verwandeln. Andererseits verwandelt man beim Bremsen eines Fahrzeuges die rollende Reibung in gleitende, die so viel höher ist, daß das Fahrzeug dadurch schnell zum Stillstand gelangt.

Nur in einem Falle wird die gleitende Reibung doch wieder günstiger als die rollende, nämlich beim Gleiten auf Schnee und Eis; hier sinkt der Reibungskoeffizient auf $\frac{1}{80}$ und noch weiter herab.

Daß im allgemeinen die rollende Reibung viel geringer ist als die gleitende, erkennt man auch leicht an unserem Beispiel vom Gleichgewicht auf der schiefen Ebene. Es ist dem praktischen Vorstellungsvermögen ohne Beweis klar, daß der auf der schiefen Fläche liegende Körper viel früher in die Abwärtsbewegung kommt, wenn er sich auf Rollen oder Rädern befindet, als wenn er mit einer Seite stumpf aufliegt. (Wir sehen also wieder, wie das Verhalten der Körper auf der schiefen Fläche durch die Größe der Reibung beeinflusst wird.)

Wiederholt ist schon erwähnt worden, daß dem Widerstand, der sich der Fortbewegung entgegenstellt, die Kraft entsprechen muß, die diesen Widerstand überwinden soll; sie muß natürlich nicht diesem Widerstande gerade gleich sein, denn dann wäre eben nur Gleichgewicht da, sondern sie muß größer sein als dieser Widerstand, damit der Körper auch wirklich fortbewegt wird. Nach allem, was wir über die Reibung wissen, ist jetzt klar, daß die Fortbewegung eines Körpers einen viel größeren Kraftaufwand erfordert, wenn der Körper stumpf auf seiner Unterlage ruht, als wenn er auf Walzen oder Rädern sich bewegt.

Das hat der Mensch sehr früh schon erkannt und ist deshalb bereits vor Jahrtausenden vom Gleittransport zum Räderfahrzeug übergegangen. Aber trotz dieser Ausnutzung der »rollenden« Reibung sind die Bewegungswiderstände noch erheblich genug.

5. Reibungskoeffizient.

Bei dem verwickelten Ursprung, den, wie wir gesehen haben, die Reibung haben kann, und bei der großen Verschiedenheit in der Beschaffenheit der Straßenoberfläche ist es nun nicht anders als durch praktische Versuche möglich gewesen, die Widerstände zu ermitteln, die sich der Bewegung eines Fahrzeuges auf einer Straße entgegenstellen. Die Reibungskoeffizienten, die man auf diese Weise ermittelt hat, drücken naturgemäß die Gesamtreibung aus, d. h. nicht nur den Koeffizienten der Reibung zwischen Rad und Straße, sondern auch die Reibung an den Achsen und etwaige sonstige Widerstände gegen die Fortbewegung, wie sie z. B. durch die Stöße ungefederter Fahrzeuge oder durch Schwingungen bei gefederten Wagen eintreten können.

In der nachstehenden Tabelle*) sind nun die ermittelten Koeffizienten (f) der Gesamtreibung für Straßenfahrzeuge angegeben, die Spalte rechts davon gibt das Produkt $f \cdot Q$, d. h. den tatsächlichen Bewegungswiderstand für die Last Q an, und die dritte Spalte besagt dasselbe, aber ausgerechnet für einen Wert $Q = 1000$ kg, der sich bei praktischen Rechnungen als sehr bequem erweist.

Koeffizient der Gesamtreibung für Straßenfahrzeuge (f)	Bewegungswiderstand $f \cdot Q$	$f \cdot Q$ für $Q = 1000$ kg
Gleise der Straßenbahnen 0,004 bis 0,005	$\frac{1}{200} \cdot Q$	5
Sehr gute chaussierte Straße 0,010	$\frac{1}{100} \cdot Q$	10
Asphaltstraße 0,013	$\frac{1}{77} \cdot Q$	13
Gute Chaussee. 0,015	$\frac{1}{66} \cdot Q$	15
Gutes Holzpflaster 0,018	$\frac{1}{55} \cdot Q$	18
Gutes Steinpflaster 0,020	$\frac{1}{50} \cdot Q$	20
Chaussee 0,023	$\frac{1}{43} \cdot Q$	23
Chaussee, staubbedeckt 0,028	$\frac{1}{36} \cdot Q$	28
Geringes Steinpflaster 0,033	$\frac{1}{30} \cdot Q$	33
Chaussee, ausgefahren, schlammig 0,035	$\frac{1}{28} \cdot Q$	35
Sehr gute Erdwege 0,045	$\frac{1}{22} \cdot Q$	45
Sehr schlechte chaussierte Straße. 0,050	$\frac{1}{20} \cdot Q$	50
Gute Erdwege } mit allen Zwischenstufen { 0,080	$\frac{1}{12} \cdot Q$	80
Schlechte Erdwege } 0,160	$\frac{1}{6} \cdot Q$	160
Sandwege 0,150 bis 0,300	$\frac{1}{3} \cdot Q$	150—300

Jedermann kann mit Hilfe dieser Angaben nunmehr leicht auf folgende Fragen die Antwort finden.

1. Frage: Welchen Widerstand setzt die und die (ganz bestimmte) Straße der Fortbewegung eines Fahrzeuges von gegebenem

*) Nach Ingenieurtaschenbuch »Hütte«.

Gesamtgewicht entgegen? (Horizontale Fahrbahn zunächst noch vorausgesetzt.)

Es sei angenommen, die Straße, die befahren werden soll, habe minderwertiges Steinpflaster; das Fahrzeug sei vollbeladen 3000 kg schwer; wir sehen aus der Tabelle, daß für geringes Steinpflaster ein Koeffizient der Gesamtreibung (f) von 0,033 oder $\frac{1}{30}$ in Ansatz zu bringen ist; Q ist gleich 3000. Der gesamte Bewegungswiderstand ($f \cdot Q$) ist also gleich $\frac{1}{30} \cdot 3000 = 100$ kg; d. h.: das einmal in Bewegung gesetzte Fahrzeug setzt auf horizontaler Strecke und bei geringem Steinpflaster seiner Fortbewegung einen Widerstand von 100 kg entgegen. Dieser Widerstand muß überwunden werden, es ist also nötig, daß an dem Wagen eine Zugkraft wirkt, die zum mindesten ein wenig größer sein muß als dieser Widerstand. Diese Zugkraft muß parallel zur Fahrbahn und im Schwerpunkt angreifend wirken; es darf weder ein Anheben noch ein Herabdrücken der zu ziehenden Last eintreten, sonst wird in der Regel ein höherer Kraftaufwand erforderlich.

Bei einem von Pferden gezogenen Wagen greift nun die Zugkraft vermittels der Zugstränge am Wagengestell an; von hier wird sie auf die Achsen übertragen, die mittels der Achsschenkel in den Naben der Räder selbst angreifen.

Betrachten wir z. B. ein einzelnes Rad. Wie stark zunächst jedes einzelne Rad belastet wird, das hängt davon ab, wie die Bauart des Wagens ist und wie die Beladung auf dem Wagen verteilt ist. Bei unserem Fahrzeug (Gesamtgewicht des beladenen Wagens = 3000 kg) können wir beispielsweise annehmen, daß auf die Hinterräder 1600 kg, auf die Vorderräder 1400 kg entfallen. Dann ist für jedes einzelne Hinterrad $Q = 800$, somit der Widerstand der Fahrbahn gegen die Fortbewegung dieses Rades = $f \cdot Q = \frac{1}{30} \cdot 800 =$ etwa 27 kg. Es muß also, um die Fortbewegung des Rades zu sichern, die an der Radmitte angreifende, in der Fahrrichtung wirkende Zugkraft mindestens etwas größer sein als 27 kg.

6. Hohe Räder

Es drängt sich hier die Frage auf, ob es für das Wirken dieser Kraft und somit für das Rollen des Rades gleichgültig ist, welchen Durchmesser das Rad hat. Für ein rollendes Rad (Bild 2) gilt die Gleichung $P \cdot r = f \cdot Q$;*) der Ausdruck $f \cdot Q$ ist uns schon bekannt, P ist die Zugkraft, r ist der Radius des Rades.

Suchen wir P , so erhalten wir $P = \frac{f \cdot Q}{r}$, woraus hervorgeht, daß P

um so kleiner wird, je größer das Rad ist (je größer r wird). Jeder Praktiker weiß ja auch, daß Wagen mit großen Rädern, vorausgesetzt, daß die Zugkraft noch in der richtigen Höhe an-

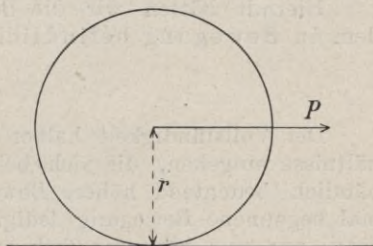


Bild 2.

*) Eingehende Untersuchungen haben allerdings ergeben, daß die Gleichung $P = \frac{f \cdot Q}{\sqrt[3]{r^2}}$ richtiger ist.

greifen kann (s. o.), leichter rollen als solche mit niedrigen Rädern. Große Räder haben aber noch in anderer Hinsicht Vorteile. Die vorstehende Tabelle der Koeffizienten der Gesamtreibung für Straßenfahrzeuge zeigt ein erhebliches Anwachsen der Widerstände bei Wegen mit schlecht oder gar nicht befestigter Decke. Das hat offenbar unter anderem seinen Grund darin, daß die Räder auf der weichen Oberfläche unter dem Druck der Wagenlast einsinken; die Fortbewegung ist dann nur möglich, wenn die Räder aus diesen sich unter ihnen bildenden Löchern immer wieder herausgehoben werden, oder wenn sie fortgesetzt neue Formänderungen der Fahrbahn bewirken; natürlich wird in beiden Fällen Arbeit verzehrt. Es ist nun klar, daß dieses Einsinken in die Straßenoberfläche um so leichter eintreten muß, je kleiner die Räder sind; bei großen Rädern verteilt sich der Druck jedes Rades auf eine größere Unterlage, der Druck pro Flächeneinheit (Quadratcentimeter) wird somit kleiner und das Rad kann nicht so tief einsinken; wenn es wirklich einmal an einer weichen Stelle tiefer einsinkt, so hat es vermöge seines weniger gekrümmten Umfangs eine flachere Anlauf-rampe, um wieder aus dem entstandenen Loch herauszukommen. Natürlich trägt auch eine Verbreiterung der Räder sehr dazu bei, das Einsinken zu verhindern, sie hat aber auch gewisse Nachteile, deren Erörterung hier jedoch zu weit führen würde. Ein weiterer Grund für die Erhöhung der Bewegungswiderstände auf minder festen Straßen ist in den Arbeitsverlusten zu suchen, die durch das fortgesetzte Aufstoßen des Rades auf Unebenheiten, kleine Steine und dergleichen, ihr Zermahlen oder ihr Überschreiten mittels Anheben des ganzen Rades, das darauf folgende Aufstoßen auf den dahinter liegenden tieferen Teil der Straßendecke usw. entstehen. Auch in dieser Hinsicht ist die Anwendung großer Räder von Vorteil, weil alle diese Stöße dabei mit geringerer Geschwindigkeit erfolgen. Die Vorteile der großen Räder werden praktisch namentlich in gebirgigen Gegenden ausgenutzt, wo vielfach steinige, mit Geröll bedeckte Wege vorkommen. Man verwendet dort vorzugsweise Karrenfahrzeuge mit nur zwei sehr hohen und meist auch recht breiten Rädern. (Daß die Stöße der Räder durch gute Abfederung sehr gemildert werden können, bedarf kaum der Erwähnung; dieses Hilfsmittel wird aber bei Lastwagen für Pferdebetrieb in der Regel nicht angewendet.)

Hiermit hätten wir die Beziehungen zwischen der Fahrbahn und dem in Bewegung befindlichen Fahrzeug hinreichend erörtert.

7. Anfahren.

Der Vollständigkeit halber müssen wir aber noch kurz auf die Verhältnisse eingehen, die sich beim »Anfahren« ergeben. Hierbei treten nämlich bedeutend höhere Bewegungswiderstände auf, als wenn die einmal begonnene Bewegung lediglich zu unterhalten ist. Zum Teil, allerdings nur zum kleinsten Teil, erklärt sich diese Erscheinung ohne weiters aus dem für die Reibung gefundenen Gesetz, daß sie im Zustand der Ruhe bedeutend größer ist als während der Bewegung. Das versteht man sofort, wenn man die oben gegebene Erläuterung des Begriffs der Reibung sich vergegenwärtigt; es ist wohl klar, daß die Adhäsion der sich berührenden Flächen, das Ineinandergreifen der hervorragenden Teilchen, inniger werden muß, wenn die Berührungsflächen sich eine Zeitlang in der Ruhe befunden haben, als während der Bewegung der Flächen aneinander, wo die »Hervorragungen« kaum Zeit haben, zum

Eingriff ineinander zu kommen. Dazu kommt, daß bei dem in Ruhe befindlichen Fahrzeug an allen geschmierten Stellen die Schmiermittel durch den Druck der Last aus den betreffenden Lagern herausgepreßt werden, daß dann vielleicht sogar, bei längerer Ruhe, die zurückbleibende dünne Schicht der Schmiermittel verharzt und nun, statt zu schmieren, d. h. die Glätte der sich reibenden Flächen zu erhöhen und damit die Reibung zu vermindern, die Flächen verklebt und dadurch die Reibung vermehrt.

Hauptsächlich aber ist das schwierige Anfahren durch die sogenannten »Beschleunigungskräfte« zu erklären, die dabei auftreten.

Um diesen Begriff zu verstehen, erinnern wir uns, daß es sich beim »Anfahren« darum handelt, vom Zustand der Ruhe, d. h. von der »Geschwindigkeit« Null zu einer bestimmten höheren Geschwindigkeit überzugehen, also eine »Beschleunigung« zu erzeugen. Dazu muß das »Beharrungsvermögen« des Fahrzeuges überwunden werden; die Kräfte, die hierzu und zur Steigerung der Geschwindigkeit bis zu dem gewollten Tempo nötig sind, treten den oben erörterten Kräften hinzu, die zur bloßen Überwindung der Bewegungswiderstände erfordert werden.

Nehmen wir des leichteren Verständnisses halber zunächst einen allgemeinen Fall der Beschleunigung an: der in Bewegung befindliche Wagen habe das Gewicht Q und die Geschwindigkeit v ; er hat dann, nach einem bekannten Gesetz, die Bewegungsenergie $\frac{Q \cdot v^2}{2 \cdot g}$; es sei nun verlangt, daß dies Fahrzeug nach Zurücklegung einer Fahrstrecke l die Geschwindigkeit v' haben soll, oder, anders gesagt, die Bewegungsenergie $\frac{Q \cdot v'^2}{2 \cdot g}$. Dann würde also die für die »Beschleunigung« nötige Arbeit betragen $\frac{Q \cdot v'^2}{2 \cdot g} - \frac{Q \cdot v^2}{2 \cdot g}$ oder $\frac{Q}{2 \cdot g} \cdot (v'^2 - v^2)$. Diese Beschleunigungsarbeit entspricht also der Arbeit einer Zusatzkraft X zu den bisherigen den Wagen bewegendem Zugkräften, die so lange wirkt, bis die Geschwindigkeit v' erreicht ist, also auf dem Wege l . Es ist somit

$$X \cdot l = \frac{Q \cdot (v'^2 - v^2)}{2 \cdot g} \quad \text{und} \quad X = \frac{Q \cdot (v'^2 - v^2)}{2 \cdot g \cdot l}$$

Handelt es sich nun um die Beschleunigung beim »Anfahren«, wo also v , die Anfangsgeschwindigkeit, $= 0$ ist, so ist in dieser Formel $v = 0$ zu setzen; sie heißt dann $X = \frac{Q \cdot v'^2}{2 \cdot g \cdot l}$.

Beantworten wir uns nun mit Hilfe dieser Formel die

2. Frage: Wie groß muß bei unserm Wagen von 3000 kg die zur normalen Zugkraft hinzutretende »Beschleunigungszugkraft« sein, wenn der in Bewegung zu setzende Wagen nach einer Anfahrstrecke von 2 m das langsame Schrittempo von 4 km pro Stunde erlangt haben soll?

4 km pro Stunde sind $= 1,1$ m pro Sekunde; der Wert g ist bekanntlich $= 9,8$; die Formel $\frac{Q \cdot v'^2}{2 \cdot g \cdot l}$ lautet in unserem Falle also $\frac{3000 \cdot 1,1^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 2}$; das ergibt rund **93** kg; wir benötigen also beim Anfahren

einen Zusatz zu der früher ermittelten Zugkraft (100), der sich auf **93 kg** beläuft, d. h., es wird für diesen allerdings nur kurzen Moment fast das Doppelte der normalen Zugkraft erforderlich. Eine wesentliche Rolle spielt hierbei, wie wir leicht erkennen, die Länge der Anfahrstrecke. Pferde, die heftig »ins Geschirr springen« und dabei vielleicht schon nach einem halben Meter Fahrstrecke das Marschtempo erreichen, verbrauchen dabei für einen kurzen Moment eine sehr bedeutende Kraft.

8. Einfluß der Steigungen.

Wir haben uns nunmehr mit dem Einfluß zu beschäftigen, den die Steigungen der Straßen auf die Fortbewegung eines Fahrzeugs ausüben.

Nehmen wir an, daß die Straße unter einem Winkel α gegen die Horizontale geneigt ist (Bild 3). Die der Schwerkraft folgende Resultante

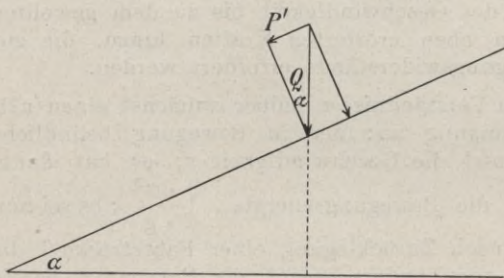


Bild 3.

des Wagengewichts Q sei, wie in Bild 1, zerlegt in eine größere Seitenkraft, die als Druck vertikal auf die Straßendecke wirkt, und eine kleinere Seitenkraft (P'), die den Wagen das Gefälle hinabzuziehen sucht, also der aufwärts ziehenden Zugkraft direkt entgegenwirkt und deshalb durch eine gleich große, aber ihr entgegengesetzt gerichtete Kraft P' aufgehoben werden

muß. Infolge der »Ähnlichkeit« der Dreiecke haben wir $\sin \alpha = \frac{P'}{Q}$ oder $Q \cdot \sin \alpha = P'$. Nehmen wir statt des Sinus des Steigungswinkels die bequemere Tangente, was bei den kleinen für Straßensteigungen vorkommenden Winkeln zulässig erscheint, so brauchen wir also zur Überwindung der Steigungswiderstände eine Zusatzzugkraft (P'), die gleich dem Wagengewicht mal der Tangente des Neigungswinkels ist. Letzterer Ausdruck deckt sich aber mit der gebräuchlichen Zahl, die die Steigung in Prozenten benennt; wie Bild 3 zeigt, ist beispielsweise bei einer Steigung von 5 pCt. die Tangente gleich $\frac{5}{100}$, also $\text{tg } \alpha = 0,05$; der Ausdruck $Q \cdot \sin \alpha$ oder wie wir der Einfachheit halber sagen wollten, $Q \cdot \text{tg } \alpha$ wird also z. B. für $Q = 1000 \text{ kg}$ gleich $1000 \cdot 0,05$, d. h. = 50 kg; das bedeutet, daß man den Bewegungswiderstand, den eine Steigung dem hinauffahrenden Fahrzeug entgegensetzt, sehr leicht und schnell pro Tonne Wagengewicht dadurch ermitteln kann, daß man die Zahl, die das Steigungsverhältnis in Prozenten ausdrückt, mit 10 multipliziert, d. h. $\frac{\text{pCt.}}{100}$ angibt.

3. Frage: Welches ist der Bewegungswiderstand, den eine Steigung von 8 pCt. der Aufwärtsfahrt eines Wagens von 3000 kg Gewicht entgegensetzt?

Antwort: Pro Tonne 80 kg, also für 3000 kg Gewicht $3 \cdot 80 = 240 \text{ kg}$ Widerstand. Somit muß für die Überwindung dieser Steigung ein Mehr an Zugkraft (gegenüber der Bewegung auf horizontaler Bahn) aufgewendet werden, das gleich 240 kg ist.

9. Summe der Bewegungswiderstände.

Fassen wir nun die Bewegungswiderstände zusammen, die durch den Zustand der Straßendecke und durch den Einfluß der Steigung hervorgerufen werden, so erhalten wir $Q \cdot f + Q \cdot \operatorname{tg} \alpha$ oder $Q \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$; der einfacheren Rechnung zu Liebe wollen wir uns aber zunächst immer an den Widerstandswert bei $Q = 1000 \text{ kg}$ halten.

4. Frage: Welchen Bewegungswiderstand findet unser Dreitonnenwagen auf guter Chaussee bei 9 pCt. Steigung? Welche Zugkraft braucht er zu ihrer Überwindung?

Der Widerstand ist $Q \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$; f ist für gute Chaussee 0,015 (oder $\frac{1}{66}$), pro 1000 kg aber = 15 kg, die Steigungsziffer ist in $\frac{0}{100} = 90$, also Widerstand pro Tonne $15 + 90 = 105$. Für 3000 kg Wagengewicht haben wir somit $3 \cdot 105 = 315 \text{ kg}$ Widerstand und folglich mindestens ebensoviel erforderliche Zugkraft zu rechnen.

Berechnen wir dann noch in der angegebenen Weise die Zusatzzugkraft, die beim »Anfahren« gebraucht wird, so haben wir die maximale Zugkraft, die für unser Dreitonnenfahrzeug auf einer Straße von der angenommenen Beschaffenheit und Steigung vorkommen kann.

Können wir nun nach diesen Beispielen die Summe der Bewegungswiderstände berechnen, die die Straße je nach dem Zustand ihrer Decke und nach dem Grad ihrer Steigung der Fortbewegung eines Wagens entgegenstellt, und somit auch die Kraft ermitteln, die erforderlich ist, um diesen Bewegungswiderständen das Gleichgewicht zu halten, so genügt dies doch noch nicht, um etwa die Zahl der »Pferdestärken« zu berechnen, die für die Fortbewegung des Fahrzeuges nötig sind; hierzu ist vielmehr noch die Fahrgeschwindigkeit einzusetzen, die von dem Wagen verlangt wird. Wir kommen hierauf bei Besprechung des mechanischen Zuges zurück; es sei jedoch schon jetzt der Vollständigkeit halber bemerkt, daß diese Zahl der Pferdestärken, die Anzahl der »PS.«,

gewonnen wird durch den Ausdruck $\frac{Z \cdot v}{75}$. Bei einem Lastwagen von 3000 kg Gewicht und bei Straßensteigungen von 9 pCt. werden wir beim Pferdebetrieb auf die Dauer nur ein Fahrtempo von etwa 3 km in der Stunde verlangen können; »v« ergibt sich dann zu 3000 m in 3600 Sekunden = 0,83 m in einer Sekunde; $\frac{Z \cdot v}{75}$ wird bei $Z = 315 \text{ kg}$:

$$\frac{315 \cdot 0,83}{75}, \text{ d. i. } = 3,5 \text{ PS.}$$

B. Mechanischer Betrieb.

1. Allgemeines.

Die Bewegungswiderstände, von denen wir bisher gesprochen haben, gelten nun ganz allgemein, für jede Art von Fahrzeugen auf der Straße, also auch für die mechanisch bewegten, zu denen wir nun übergehen. Sie haben aber hier eine ganz besondere Bedeutung, denn sie geben direkt die Kraft an, die das mechanische Fahrzeug an den Räder umfängen entwickeln muß, um sich fortbewegen zu können. Denn hier,

an den Radumfängen, muß ja die Maschinenkraft eines mechanischen Fahrzeuges wirksam werden. Wenn wir ein Fahrzeug in Bewegung setzen wollen, an dem keine ziehende Kraft wirkt, so tun wir das in der bekanntesten Weise, daß wir in die Speichen der Räder fassen und die Räder mit Gewalt herumzudrehen suchen. Dieses gewaltsame Herumdrehen der Räder muß beim mechanischen Fahrzeug die Maschine bewirken. Denken wir an das bekannteste mechanische Fahrzeug, die Lokomotive; jedes Kind weiß, daß die an der Seite der Lokomotive aus den Zylindern herausschauenden Kolbenstangen mittels einer besonderen Einrichtung an den Rädern angreifen und diese mit Gewalt herumdrehen, so daß das ganze schwere Fahrzeug sich in Bewegung setzen muß. Jeder weiß auch, daß das nicht immer gelingt, daß vielmehr unter Umständen das Fahrzeug auf der Stelle bleibt, obwohl die Räder von der Maschine herumgedreht werden. Ein bekannter und sehr einleuchtender, obschon nicht der einzige Grund hierfür ist die manchmal vorkommende große Glätte der Schienen. Wollen wir diesem Grund einen physikalischen Ausdruck geben, so werden wir sagen müssen, die Räder finden auf den zu glatten Schienen nicht die erforderliche »Reibung«. Wie wir hieraus ersehen, ist Voraussetzung für die mechanische Fortbewegung, daß die Räder nicht ins »Gleiten« kommen, sondern bei der Berührung der Fahrbahn durch feste innige Anpressung an diese stets eine genügende Stütze für das Weiterschieben des Wagens finden. Haben wir beim Pferdefahrzeug gesehen, daß die »Reibung« ein Hindernis für die Fortbewegung ist, so sehen wir hier, daß ein mechanisches Fahrzeug die Reibung auf der Straßendecke notwendig für seine Vorwärtsbewegung braucht. Die mechanisch angetriebenen Räder müssen also auf ihrer Fahrbahn einen genügenden »Reibungswiderstand« finden, wenn sie überhaupt das Fahrzeug fortbewegen sollen; »genügend« ist dieser »Reibungswiderstand« dann, wenn er größer ist als der entgegenstehende »Bewegungswiderstand«. Haben wir also z. B. wie oben die Summe der Bewegungswiderstände zu 315 kg ermittelt, so muß der »Reibungswiderstand« zwischen Triebrädern und Fahrbahn größer als 315 kg sein. Dieser Reibungswiderstand ist nun nach den uns bekannten Gesetzen der »Reibung« zu ermitteln. Da die Räder verhindert werden sollen, auf der Fahrbahn zu »gleiten«, so handelt es sich offenbar um »gleitende« Reibung. Sie ist, wie wir wissen, wesentlich abhängig vom »Druck« und von der Beschaffenheit der sich gleitend drückenden Oberflächen. Nennen wir den senkrechten oder »Normal«-Druck »N«, so ist der Reibungswiderstand »W« = $\mu \cdot N$, wobei man mit » μ « den sogenannten Koeffizienten der gleitenden Reibung bezeichnet. Dieser Koeffizient ist für eine größere Anzahl von aufeinanderreibenden Materialien durch Versuche festgestellt. Er beträgt beispielsweise für Stahl auf Stahl (wie bei den Lokomotivrädern) 0,15 oder etwa $\frac{1}{7}$, für Eisen auf Stein oder Kies (wie bei den eisenbereiften Rädern der Lastkraftwagen auf der Straßendecke) 0,42 bis 0,49; für Stahl auf Eis (wie bei Lastwagenrädern auf vereisten Straßen) nur 0,027.

Die für die Fortbewegung unerlässlichen Dienste dieses Reibungswiderstandes können nun natürlich nur an solchen Rädern nutzbar gemacht werden, die durch die Maschine »angetrieben« werden. Denken wir wieder an die Lokomotive, so haben wir in der Regel einen sehr langen Zug von Wagen mit nichtangetriebenen Rädern, die also nur »Bewegungswiderstände« aufweisen; zur Überwindung dieser Bewegungswiderstände stehen nur einige wenige »angetriebene« Lokomotivräder zur

Verfügung; wir sehen ohne weiteres, daß da eine Bewegung nur dann möglich sein kann, wenn diese wenigen von der Maschine getriebenen Räder einen außerordentlich hohen »Reibungswiderstand« auf ihrer Fahrbahn finden; und dafür hat eben der Konstrukteur der Lokomotive zu sorgen. Da in dem Ausdruck $\mu \cdot N$ der Koeffizient μ eine gegebene Größe ist, so bleibt nur übrig, den Wert von N so groß wie irgend zulässig zu machen. Diesen Wert N , also den Druck oder das Gewicht der Lokomotive möglichst groß zu machen, ist bei den besonderen Verhältnissen der Eisenbahnen unschwer zu erreichen, denn der starke Unter- und Oberbau der Eisenbahn verträgt so hohe Gewichte der Lokomotiven. Es leuchtet aber ein, daß ein gleiches auf Straßen keineswegs zulässig ist. Einerseits also zeigt das Beispiel von der Lokomotive deutlich, daß ein längerer Zug nichtangetriebener Achsen, mit der auf ihnen ruhenden Last, ohne Zweifel nur dann von einem Maschinenwagen gezogen werden kann, wenn die angetriebenen Achsen oder Räder stark belastet sind, also einen hohen Druck auf die Fahrbahn ausüben. Andererseits besteht kein Zweifel, daß ein sehr hoher Druck auf das Straßenmaterial, je nach dessen Güte, mehr oder weniger zermalmend wirken muß. Dazu kommt ferner, daß die Räder eines solchen Maschinenwagens, sofern sie »angetrieben« sind, nicht einmal lediglich durch ihren »Druck« auf die Straße wirken, sondern daß sie an der Stelle, wo sie den Boden berühren, stark schiebend an der Straße angreifen. Wir haben uns früher schon klar gemacht, daß die Wirkung der Reibung zum großen Teil auf einen »Eingriff« hervorragender Teilchen der beiden aufeinanderreibenden Flächen zurückzuführen ist; man kann die Fortbewegung eines »Trieb«-Rades also etwa vergleichen mit dem Fortschreiten eines Zahnrades (mit sehr feiner Zahnung) auf einer Zahnstange (der rauhen, also sehr fein gezahnten Straßendecke). Das Rad sucht die Zahnstange unter sich fortzuschieben; hält sie stand, so schreitet das Rad selbst fort. Es ist hiernach zuzugeben, daß der Betrieb mit sehr schweren Kraftfahrzeugen die Straße stärker und anders beansprucht als das Fahren gleichschwerer Pferdefahrzeuge.

Man darf aber nicht vergessen, daß bei den letzteren die Pferde den Straßen erheblichen Schaden tun, indem sie durch die Stollen ihrer Hufe, mit denen sie sich festkrallen, um für das Ziehen den nötigen Halt zu finden, die Straßendecke zerstören; denn auch hier soll gleitende Reibung erzeugt werden, was nur durch Eingriffe in die Straßendecke möglich ist; und diese Eingriffe sind gerade hier besonders roh und verderblich.

2. Zulässiger Raddruck auf Straßen.

Es muß, auch für die festesten Straßen, eine Grenze des zulässigen Raddrucks geben, die nicht ohne Schaden für die Straße überschritten werden kann. Man nimmt im allgemeinen an, daß diese Grenze bei vielen Straßen der jetzigen Bauart etwa bei 2500 kg Druck für jedes einzelne Rad liegt. Da Kraftfahrzeuge in der Regel so gebaut werden, daß hinten die belasteten Triebräder sind, während die Vorderäder der Lenkung dienen, so erhalten wir einen zulässigen Achsdruck der Triebachse von 5000 kg. Bei Lastkraftwagen wird nun das Gewicht häufig so auf die Achsen verteilt, daß die Vorderachse nur halb so stark belastet ist wie die hintere »Trieb«-Achse. Danach würde die Vorder-

achse mit 2500 kg belastet werden und somit das ganze Fahrzeug nur 7500 kg wiegen. Gegen die Zulassung von Lastkraftfahrzeugen, die dieses Gewicht nicht übersteigen, können gesetzliche Einwendungen kaum gemacht werden, da nach einer alten Bestimmung Fahrzeuge mit einem »Ladungsgewicht« von 7500 kg zum Verkehr auf den Straßen allgemein zuzulassen sind (die bei Annahme eines »Eigengewichts« von nur 1500 kg ein Gesamtgewicht von mindestens 9000 kg erreichen müssen).

Es bestehen aber zur Zeit vielfach Zweifel darüber, ob überhaupt auf Lastkraftfahrzeuge ohne weiteres die für Pferdefahrzeuge geltenden Bestimmungen anwendbar sind. Über den Verkehr mit Kraftfahrzeugen sind, wie bekannt sein dürfte, zwischen den Bundesregierungen »Grundzüge« vereinbart worden. Hiernach sind in den einzelnen Bundesstaaten Polizeiverordnungen erlassen; diese sollen aber nach § 1, Absatz 4 der Grundzüge auf die Lastkraftwagen keine Anwendung finden. Somit müssen letztere doch wohl vorläufig den Gesetzen unterliegen, die in den verschiedenen Landesteilen den Verkehr der Fuhrwerke auf öffentlichen Straßen regeln. Danach wären Lastkraftfahrzeuge zuzulassen, wenn sie den Vorschriften entsprechen, die bezüglich des Ladungsgewichts, der Radfelgenbreite, der Beschaffenheit der Radkränze, der Zahl der Anhängerwagen usw. gegeben sind. Nur wo diesen Vorschriften nicht entsprochen werden kann, würden die betreffenden Lastkraftfahrzeuge erst auf Grund einer Verständigung mit den Eigentümern der Straße oder den Wegebaupflichtigen zugelassen werden können.

Um Schwierigkeiten vorzubeugen, die, bei der bestehenden Unsicherheit, der Einrichtung von Betrieben mit Lastkraftfahrzeugen entgegenzutreten könnten, haben die Minister des Innern, der öffentlichen Arbeiten und für Landwirtschaft, Domänen und Forsten unterm 16. Juni 1907 eine Verfügung erlassen, wonach für Lastkraftfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht (von Fahrzeug und Ladung) von nicht mehr als 7,5 t die Zulassung stets zu erteilen ist, da sie das für den Gemeingebrauch der Wege zulässige Höchstgewicht nicht überschreiten. Sollten durch den Verkehr mit solchen Fahrzeugen Schäden an den Wegen entstehen, so soll die Regelung der Entschädigung in jedem einzelnen Fall, erforderlichenfalls durch ein Schiedsgericht, erfolgen.

Der Erlaß einer besonderen Vorschrift für die Regelung des Verkehrs mit »schweren« Lastkraftwagen auf öffentlichen Wegen ist vorbehalten worden.

Es erscheint kaum angängig, bei Erlaß einer solchen Vorschrift die vorläufig angenommene Höchstgrenze des zulässigen Gesamtgewichts (7500 kg) aufrecht zu erhalten. Wird überhaupt anerkannt, daß der Betrieb mit Kraftfahrzeugen zum »Gemeingebrauch« der Wege gehört, so kann er ohne Gesetzesänderung nicht verboten werden; daß er unter den Gemeingebrauch der Wege fällt, wird man nicht bestreiten können, sofern nur die Kraftfahrzeuge in ihrer Bauart usw. den gesetzlichen Bestimmungen entsprechen. Trifft dies aber zu, und dafür werden die Betriebsunternehmer oder die Konstrukteure zu sorgen haben, so kann die obere Grenze des Gesamtgewichts nicht willkürlich für Kraftfahrzeuge niedriger angesetzt werden als für gewöhnliches Lastfuhrwerk; man würde also eine Höchstgrenze von 9000 kg zugestehen müssen. Belastet man dann die »Trieb«-Achse (in der Regel die hintere) mit 5000 kg, wie vorstehend begründet wurde, so darf die Vorderachse bis zu 4000 kg Achs-

druck erhalten. Das Eigengewicht eines solchen Kraftwagens zu 4000 kg angenommen, bleiben 5000 kg für die Nutzlast.

Der Erlaß einer Vorschrift, die derartige Lastkraftwagen allgemein auf Chausseen zuließe, würde die Einführung mechanischer Transportbetriebe außerordentlich erleichtern. Lastkraftfahrzeuge sind teuer; wer sich eine solche Maschine beschafft, muß damit rechnen können, daß der Betrieb sich wirtschaftlich gestalten läßt. Von den Kraftwagen muß also eine hohe Leistung verlangt werden; nur dann kann sich die kostspielige Anschaffung und Betriebseinrichtung sowie der teure Betrieb selbst rentieren. Deshalb wird in der Regel verlangt, daß der Kraftwagen die volle Ladung einer Eisenbahnlore auf einmal befördert; das sind 10 tons oder 10 000 kg; eine solche Leistung kann zwar von dem Kraftwagen allein nicht erwartet werden, seine Beladung mit 10 000 kg



Bild 4.

würde ja auch nach dem oben Gesagten nicht zulässig sein; aber ein guter Kraftwagen mit einer starken Maschine kann einen Anhängerwagen ziehen, der bei 2000 kg Eigengewicht gut 5000 bis 6000 kg Nutzlast aufnehmen kann. Bei solcher Leistung würde sich der Kraftwagen bald zahlreiche Freunde erwerben (Bild 4, sog. leichter Lastzug).

3. Vierräderantrieb.

Gegen den Betrieb mit solchen Kraftwagen sind sicher von seiten der Wegebaupflichtigen Einwände zu erwarten. Jede neue Errungenschaft auf dem Gebiet des Verkehrswesens stößt eben anfangs auf Schwierigkeiten; aber selbst wenn die gegen solche Fahrzeuge vorgebrachten Einwände zunächst zum Teil gerechtfertigt erscheinen sollten,

so kann die Parole doch nur sein: Die Schwierigkeiten müssen überwunden werden, der Fortschritt muß erkämpft werden. Durch die gedachte Vorschrift würde der weiteren Entwicklung vorerst der Weg geebnet werden. Freilich kann bei dem gestatteten Höchstgewicht der Lastkraftwagen, das in Ansehung des hohen Preises derartiger Fahrzeuge doch nur mäßig ist, auch immer erst eine entsprechend mäßige Transportleistung erzielt werden. Aber der Konstrukteur wird Mittel finden, um auch unter diesen Bedingungen den mechanischen Betrieb selbst großen Aufgaben gegenüber lebensfähig zu gestalten; dazu ist der Anlauf bereits genommen. Die jetzige Beschränkung besteht ja im wesentlichen nur in der Unzulässigkeit hoher Gewichte. Kann nun der für einen großen Wert der Reibung nötige hohe Druck nicht dadurch erzielt werden, daß wenige Räder besonders stark belastet werden, so bleibt nur übrig, den nun einmal erforderlichen Reibungsdruck auf viele Räder zu verteilen, so daß er an jeder einzelnen Stelle das zulässige Maß nicht überschreitet. Mit anderen Worten: Die mechanische Lastbeförderung auf Straßen kann nur dadurch zu höheren Leistungen gebracht werden, daß möglichst viele Räder »angetrieben« werden. Es entsteht natürlich auf diese Weise ein aus mehreren Fahrzeugen zusammengesetzter Zug. Solche Züge sind nach den jetzigen Bestimmungen auf Straßen nicht gestattet; es dürfen nicht mehr als zwei Fahrzeuge miteinander verbunden sein. Durch diese Bestimmung sollte den Nachteilen vorgebeugt werden, die für die Straßendecken befürchtet wurden, wenn dicht hintereinander mehrere Fahrzeuge sich »spurend« folgen, so daß die Räder des zweiten in die Radspuren des ersten kommen, diese vertiefen und so, besonders bei aufgeweichten Straßen, eine Zerstörung der Straßendecke einleiten. Wenn alle Fahrzeuge auf den Straßen immer »rechts führen«, wie es vorgeschrieben ist, würde diese zum Schutz der Straßen getroffene Maßnahme nichts nutzen; denn auch die nicht miteinander verbundenen Wagen würden immer wieder ziemlich genau in dieselben Radspuren kommen; tatsächlich sieht man auch auf stark befahrenen Straßen in der Nähe der Großstädte, wo der dichte Verkehr zur Einhaltung der Fahrdisziplin zwingt, in der Regel tief ausgefahrene Spuren, so daß sich sogar die Neubeschotterung oft auf diese Spurrinnen beschränkt. Auf weniger belebten Straßen ist freilich von einem »Rechtsfahren« leider kaum die Rede. Die Wagen bummeln achtlos dahin, wie die Pferde laufen wollen, und so wird allerdings ein »Spuren« der Wagen vermieden.

Beim Betrieb mit dem mechanischen Zug läßt sich nun aber ein Spuren sehr leicht dadurch vermeiden, daß an den einzelnen Achsen innerhalb des Zuges verschiedene Spurweiten angewendet werden. Die Spurränder, die durch das eine Räderpaar entstanden sind, werden dann durch das folgende wieder fortgewalzt. Freilich würden auch dadurch mit der Zeit bei starkem Verkehr zwei breite Spurrinnen*) entstehen. Dem läßt sich nur dadurch vorbeugen, daß das »Rechtsfahren« so gehandhabt wird, daß die Züge die rechte Straßenhälfte in der ganzen Breite in Anspruch nehmen und gleichmäßig abzunutzen suchen, ein Notbehelf, den man belächeln wird, wenn man erst einmal dahin gelangt sein wird, daß das

*) Eigentlich könnten Spurrinnen gar nicht entstehen, wenn die Radfelgen sehr breit sind, der Druck pro 1 qcm also sehr gering ist; aber viele Straßen sind von so schlechtem Material gebaut, daß die Bildung von Spurrinnen wohl zur Zeit überhaupt nicht völlig zu vermeiden ist.

ganze Kunststraßennetz derart ausgebaut ist, daß es die wirtschaftlich zweckmäßigsten schwersten Raddrucke der mechanischen Fahrzeuge ohne Schaden verträgt, oder wenn für die schweren Kraftwagen eigene Straßen geschaffen sind. Aber wann wird es soweit sein?

4. Einfluß der Witterung.

Aber nicht genug damit, daß sehr hohe Gewichte zur Erzielung eines großen Reibungswertes auf Straßen zur Zeit nicht anwendbar sind, erwächst dem mechanischen Betrieb hier noch eine ganz besondere Schwierigkeit aus dem Umstande, daß der »Koeffizient« der Reibung auf Straßen außerordentlichen Schwankungen unterworfen ist durch den großen Einfluß, den die Witterung auf die Straßen der jetzigen Bauart ausübt. Die oben angegebenen Koeffizienten der Reibung (0,42 bis 0,49) gelten nämlich nur für trockene Straßendecke. Durch Regen und namentlich durch den dabei auftretenden Schlamm, der wie ein Schmiermittel wirkt, können diese Werte der Koeffizienten bis auf $\frac{1}{10}$ herabsinken, auf Schnee und Eis sogar noch weiter, wie die obige Angabe des betreffenden Koeffizienten zeigt. Es leuchtet ein, daß bei einem solchen Herabsinken des nutzbaren Wertes der Reibung auf der Straße dem einzelnen »angetriebenen« Rade allenfalls zugemutet werden kann, seinen eigenen Bewegungswiderstand zu überwinden, nicht aber noch einigen anderen, nicht angetriebenen Rädern zu helfen. Somit wird uns auch der Einfluß der Witterung dazu führen müssen, anzuerkennen, daß der mechanische Betrieb auf Straßen nur dann gesichert ist, wenn sich an einem Fahrzeug oder in einem Zug möglichst wenig nicht angetriebene oder möglichst viele »angetriebene« Räder befinden.

Rechenbeispiele.

Beantworten wir uns zum Schluß dieser Betrachtungen über den Einfluß der Straße auf den Betrieb von mechanischen Fahrzeugen die folgenden Fragen:

5. Frage: Welcher nutzbare Wert der Reibung wirkt am Umfange der »angetriebenen« Räder eines für den Verkehr auf guten Straßen bestimmten Maschinenwagens, wenn auf den »angetriebenen« Rädern ein Gewicht (N) von 3000 kg lastet?

Der Reibungswert*) »W« ist $= \mu \cdot N$, also unter sehr günstigen Verhältnissen $0,45 \cdot 3000 = 1350$ kg.

Bei schlammbedeckter Straßendecke kann dieser Wert, wie wir gesehen haben, auf $\frac{1}{10}$, d. h. auf 135 kg, herabgehen.

6. Frage: Wie verhält sich ein solches Fahrzeug, wenn es im ganzen 5000 kg wiegt, bei verschiedenem Wetter auf einer guten Chaussee mit 10 pCt. Straßensteigung?

Gute Chaussee bietet, wie wir gesehen haben, pro 1000 kg Wagen- gewicht 15 kg Bewegungswiderstand in der Ebene (siehe die Tabelle auf

*) Für diesen Begriff wird oft auch die Bezeichnung »Reibungsstützkraft« gewählt, die aber dem Laien nicht recht verständlich sein dürfte; wir verstehen darunter den für die Fortbewegung nutzbaren Wert der Reibung; von anderen wird der Ausdruck auch als Übersetzung von »Reibungskoeffizient« angewendet.

Seite 10); für 5000 kg Gewicht sind also $5 \cdot 15 = 75$ kg Bewegungswiderstand zu rechnen. 10 pCt. Steigung sind $100 \frac{0}{100}$, also ist der durch die Steigung hinzutretende Bewegungswiderstand pro 1000 kg = 100 kg, für 5000 kg = 500 kg (Steigungswiderstand). Folglich ist die Summe der Bewegungswiderstände zu $75 + 500 = 575$ kg anzunehmen. Dazu tritt, wie wir wissen, unter Umständen noch ein erheblicher Wert für die Beschleunigung beim »Anfahren«.

Es war nun angenommen, daß auf die »Trieb«-Räder nur 3000 kg von dem Gesamtgewicht von 5000 kg kommen sollten. Es ergibt sich also der im Beispiel 5 errechnete günstigste Reibungswert 1350 kg. Da dieser erheblich größer ist als die oben ermittelte Summe der Bewegungswiderstände (575 kg), so ist die Fortbewegung des Fahrzeugs bei $\mu = 0,45$ gesichert. Auch das »Anfahren« wird, solange die Straße trocken ist, keine Schwierigkeiten bieten.

Nehmen wir nun aber an, daß infolge von Regen der Reibungskoeffizient μ auf den Wert von 0,20 herabsinkt, so erhalten wir einen Reibungswert von nur $0,20 \cdot 3000 = 600$ kg, also nur wenig mehr als die nach obiger Rechnung während der Fahrt auftretenden Bewegungswiderstände, die sich auf 575 kg belaufen. Sehen wir davon ab, daß auch dieser Wert durch das schlechte Wetter beeinflusst sein (und zwar in der Regel sich erhöht haben) wird, so ist bei einer Reibungsstützkraft von 600 kg zwar die »Fortbewegung« des einmal in Fahrt befindlichen Wagens noch immer gesichert, das »Anfahren« auf der Steigung, das die Bewegungswiderstände sehr erheblich vermehrt, ist aber nunmehr ausgeschlossen. Kommt der Wagen einmal auf der Steigung zum Halten, so wird ein erneutes Anfahren nur dadurch ermöglicht werden können, daß der Reibungskoeffizient auf der kurzen, für das Anfahren nötigen Strecke auf einen möglichst hohen Wert gebracht wird; dies ist dadurch zu erreichen, daß man vor den Triebrädern den Schlamm entfernt und, wenn das nicht wirkt, Kies streut oder trockene Bretter, Lappen und dergleichen vor die Räder legt.

Sinkt der Reibungskoeffizient noch weiter herab, wie z. B. im Winter, bei beeister Fahrbahn, so wird nicht nur das Anfahren, sondern auch das »Inbewegung-Erhalten« zur Unmöglichkeit.

Nehmen wir nun aber beispielsweise an, daß alle vier Räder unseres Fahrzeugs »angetrieben« wären. Wir nutzen dann nicht nur die 3000 kg Druck aus, die auf der Hinterachse lasten, sondern das volle Gesamtgewicht des Fahrzeugs (5000 kg). Der Reibungswert $W (= \mu \cdot N)$ wird nunmehr unter den angenommenen ungünstigen Verhältnissen $= 0,20 \cdot 5000 = 1000$ kg, bleibt also den ermittelten Bewegungswiderständen (575 kg) wesentlich überlegen. Wenn wir freilich beeiste Fahrbahn annehmen mit $\mu = 0,03$, so hört auch bei Antrieb aller vier Räder der Betrieb auf der zehnprozentigen Steigung auf, denn W wird dann $= 0,03 \cdot 5000 = 150$; auf ebener Straße, wo die Bewegungswiderstände, sofern die Eisbahn nicht mit Schnee bedeckt ist, kaum über 15 kg pro 1000 kg Last betragen werden, bleibt aber der Betrieb gesichert, da dem nutzbaren Reibungswert von 150 kg nur $5 \cdot 15 = 75$ kg Bewegungswiderstände entgegenstehen.

Für den Betrieb auf Schnee liegen einwandfreie Zahlen unseres Wissens nicht vor; die Widerstände schwanken hier außerordentlich, je nach der Art des Schnees, der Lufttemperatur, der Höhe der Schneedecke. Ebenso unsicher sind hier die Werte für μ . Schnee ist bekanntlich auch für

viel mächtigere mechanische Transportmittel, wie die Eisenbahn, oft ein unüberwindliches Hindernis. Er ist es aber fast ebenso auch für die Pferdefahrzeuge schwererer Art; leichte Wagen kommen allerdings, auf Schlittenkufen gesetzt, auch im tiefen Schnee noch durch.

Wir gelangen somit zu dem erwarteten Resultat, daß bei erheblichem Sinken des Reibungswertes nicht angetriebene Räder nicht mehr mitgeschleppt werden können, sondern nur die »angetriebenen« vorwärtskommen, indem sie ihre eigenen Bewegungswiderstände überwinden und sich auch gegenseitig helfen, da ja niemals alle Räder zu gleicher Zeit auf Wegstellen geraten, die keine genügende Reibung bieten. Auch gegenüber den Einflüssen der Witterung ist also nur auf dem Wege Abhilfe möglich, daß die Zahl der angetriebenen Räder möglichst vermehrt wird.

II. Die verschiedenen Systeme von Lastkraftfahrzeugen.

Untersuchen wir nun, wie sich diesen eigenartigen Betriebsbedingungen gegenüber die verschiedenen Systeme von Lastkraftwagen verhalten, unter welchen Verhältnissen sie existenzberechtigt sind, unter welchen nicht.

Zunächst sind einige Worte vorauszuschicken über Wesen und Unterschiede der Hauptsysteme hinsichtlich der Betriebsart.

Einteilung.

Man kann zwei Gruppen von mechanisch bewegten Straßentransportmitteln unterscheiden: solche, die die Kraftquelle auf sich selbst, sozusagen »an Bord« mitführen und daher für eine längere oder kürzere Zeit die zur Unterhaltung der Fortbewegung nötige Kraft selber erzeugen können, und solche, denen die Kraft von einer außerhalb befindlichen Kraftquelle aus zugeführt werden muß. Die bekanntesten Repräsentanten dieser beiden Hauptgruppen sind einerseits die von Dampflokomotiven gezogenen Eisenbahnzüge, deren Kraftwagen aus dem mitgeführten Kohlen- und Wasservorrat sich fortgesetzt die zur Fortbewegung nötige Kraft erzeugen, und andererseits die elektrischen Bahnen, bei denen den auf der Gleisstrecke fahrenden Zügen die Betriebskraft von einer oder mehreren Zentralstellen aus zugeführt wird.

Denken wir uns diese beiden Systeme auf schienenlose, auf der gewöhnlichen Straße verkehrende Fahrzeuge oder Züge übertragen, so erkennen wir sogleich als einen großen Vorzug des ersteren Systems, daß seine Fahrzeuge oder Züge jede beliebige Straße benutzen können, während die nach dem zweiten System betriebenen Fahrzeuge oder Züge lediglich auf denjenigen Straßen zu verkehren vermögen, an denen sich die Anlagen zur Zuführung des elektrischen Stromes befinden. Es ist klar, daß das letztere System unter Umständen, wenn es sich um einen Betrieb auf ganz bestimmten Transportstrecken handelt, von Vorteil sein

kann; im allgemeinen ist aber wohl einleuchtend, daß dieses System nicht das Ideal des mechanischen Betriebes sein darf, da es als eine Hauptforderung für die Konstruktion von mechanischen Fahrzeugen und Zügen hinzustellen ist, daß sie frei beweglich, also von etwaigen besonderen Betriebsanlagen an den Straßen ganz unabhängig sein müssen.

Überschauen wir nun die große Menge der Fahrzeuge dieses letzteren Systems und suchen wir sie zu ordnen, so bilden sich wiederum zwei Gruppen: erstens Fahrzeuge, zu deren Betrieb die im Kohlenstoff aufgespeicherte Energie in irgend einer Form, aber an Bord des Fahrzeugs, ausgenutzt wird, zweitens die mit Elektrizität betriebenen Fahrzeuge.

A. Antrieb durch Wärmekraftmaschinen.

Wir wissen, daß jede auftretende Arbeit auf Wärme zurückzuführen ist; wo Arbeit geleistet wird, geht Wärme verloren und umgekehrt. Diese Beziehungen sind meßbar; einer Wärmeeinheit (d. h. der Wärme, die nötig ist, um 1 kg Wasser von 0° C. unter gleichbleibendem Druck auf 1° C. zu erwärmen), entspricht eine Arbeit von 424 mkg (die Kraft, die nötig ist, um 1 kg 1 m hoch zu heben, heißt 1 mkg; eine Leistung von 75 mkg in einer Sekunde nennen wir 1 PS, Pferdestärke). Die Maschinen, die den Zweck haben, die in den Brennstoffen steckenden Mengen von Wärmeeinheiten in Arbeit zu verwandeln, heißen Wärmekraftmaschinen; eine solche Maschine wird umso vollkommener sein, je gründlicher sie die Brennstoffe ausnutzt. Das wird um so vollständiger erreicht, je unmittelbarer diese Verwertung des Brennstoffs erfolgt und je weniger Verluste sich dabei ergeben.

1. Dampfmotoren.

Für die Dampfmotoren kommen im allgemeinen folgende Brennstoffe in Betracht:

a. Feste Heizstoffe (Kohle, Holz usw). Sie werden in der Weise ausgenutzt, daß durch die bei ihrer Verbrennung entwickelte Wärme zunächst Wasser in Dampf verwandelt, dieser Dampf in einem starkwandigen »Kessel« auf hohe »Spannung« getrieben und nun erst diese Spannung zum Treiben eines Kolbens in einem »Zylinder« benutzt wird, der die weitere Arbeit verrichtet. Auf diesem weiten Weg geht natürlich sehr viel Wärme verloren, nur etwa 10 bis 12 pCt. der in der Kohle vorhandenen Wärmeeinheiten können in der Regel nutzbar gemacht werden. Messungen*) haben z. B. ergeben, daß bei einer guten Maschine von 100 pCt. der in der Kesselfeuerung erzeugten Wärme 57,9 pCt. im Kondensator abgeführt, 29 pCt. durch den Kessel ausgestrahlt wurden; nur 13,1 pCt. blieben für die Arbeit in den Zylindern und auch hiervon gingen durch Maschinenreibung noch etwa 1,3 pCt. verloren, so daß schließlich nur noch 11,8 pCt. der verbrauchten Wärme effektive Arbeit leisteten.

Die zur Heizung von Dampfkesseln verwendbaren Brennstoffe sind hinsichtlich ihres Gehalts an Wärmeeinheiten sehr verschieden; es enthalten:

*) »Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure«, Band 50, Nr. 34.

Anthracit	8110	Wärmeeinheiten	in	1 kg	Brennstoff
»Sandkohle«	7760	»	»	1 »	»
»Backkohle«	7500	»	»	1 »	»
Holzkohle	7750	»	»	1 »	»
Koks	7430	»	»	1 »	»
»Sinterkohle«	6600	»	»	1 »	»
Braunkohle	3600 bis 5350	»	»	1 »	»
Torf	3550	»	»	1 »	»
Holz	2820	»	»	1 »	»

b. Flüssige Heizstoffe. Sie besitzen meist einen höheren Wärmegehalt als die unter 1. genannten Heizstoffe; wo es darauf ankommt, mit möglichst wenig Brennstoff recht viel Wärme zu entwickeln, werden deshalb diese Brennstoffe mit Erfolg verwendet.

Es enthalten:

Petroleum	10 000	Wärmeeinheiten	in	1 kg
Benzin	10 000 bis 12 000	»	»	1 »
Spiritus	etwa 7 500	»	»	1 »

Auch diese Brennstoffe werden, wie das Holz und die verschiedenen Arten der Kohle beim Betrieb von Dampfmaschinen lediglich zur Kesselheizung verwendet. Sie eignen sich besonders für mit Dampf betriebene Straßenfahrzeuge, weil man durch ihre Anwendung die in gewissem Sinne »tote« Last der Brennstoffe ermäßigt, die das Fahrzeug bei sich führen muß; sie enthalten eben in einem dem Gewicht nach gegebenen Brennstoffvorrat mehr Wärmeeinheiten, als das gleiche Quantum Kohle usw. enthalten würde. Dadurch erhöht man den sogenannten »Aktionsradius« des Fahrzeugs, d. h. diejenige Fahrstrecke, die das Fahrzeug zurücklegen kann, ohne seinen Betriebsstoffvorrat zu ergänzen.

c. Beurteilung der Dampfmaschine. Welcher Brennstoff aber auch verwendet wird, der schon erwähnte Nachteil der sehr geringen Ausnutzung der in den Brennstoffen mitgeführten Wärmeeinheiten ist bei der Dampfmaschine auf keine Weise zu beseitigen. Das liegt vor allem daran, daß die Wärmeerzeugung und die Wärmeausnutzung räumlich und zeitlich voneinander getrennt erfolgen müssen; die Erzeugung im »Kessel«, die Ausnutzung in den Zylindern oder, wie man sagt, im »Motor«. Es findet also eine Wärmeübertragung statt, und diese muß immer auch einen Wärmeverlust zur Folge haben. Daraus ergibt sich ein hoher Verbrauch von Brennmaterial. Da dieses aber auf einem Straßenfahrzeug (ohne Tender) nur in geringer Menge mitgeführt werden kann, ist es nach kurzer Zeit verbraucht und muß ergänzt werden; der Dampfmotor hat also einen geringen »Aktionsradius«. Ein weiterer Nachteil liegt in den unvermeidlichen »toten« Gewichten und den Raumansprüchen des Dampferzeugers. Seit langer Zeit sind zahlreiche Bestrebungen im Gange, diese Mängel zu beseitigen. Diese Bemühungen sind nicht ganz ohne Erfolg gewesen; man hat die Heizanlage bei Verwendung flüssiger Brennstoffe auf einen erstaunlich kleinen Raum zusammenzudrängen gewußt; man hat in genialer Weise sehr kompensierte Kessel konstruiert; man wendet wirksame Kondensatoren an, um mit wenig Wasser auszukommen; man hat Einrichtungen getroffen, die es ermöglichen, fast ganz ohne Vorrat an Dampf zu fahren, indem man den

Dampf fast im Moment des Verbrauchs erzeugt. Aber alle Bemühungen konnten bis jetzt nicht zu einem so nachhaltigen Erfolg führen, daß irgend eins dieser Systeme sich auf die Dauer lebensfähig erwiesen hätte. Es bleibt immer:

1. ein hoher Verbrauch an Brennstoffen;
2. ein verhältnismäßig hohes totes Gewicht;
3. ein ziemlich hoher Raumbedarf der mechanischen Einrichtungen;
4. ein mäßiger Aktionsradius.

Unbestreitbare Vorzüge des Dampf wagens sind dagegen:

1. die Einfachheit und Übersichtlichkeit, wodurch die Bedienung sehr erleichtert wird;
2. die große Betriebssicherheit (eine Folge der gründlichen Kenntnis aller Konstruktionsbedingungen des seit vielen Jahrzehnten erprobten und durchstudierten Systems);
3. die Möglichkeit, leicht erhältliche und billige Brennstoffe zu verwenden;
4. die Elastizität der Kraftäußerung, die eine vorübergehende Überlastung ermöglicht.

Trotz dieser Vorzüge hat der Dampf motor, den man schon vor 100 Jahren auf den Straßen zu verwenden gesucht hat, nicht vermocht, sich dieses Gebiet zu erobern. Sein für große Leistungen unvermeidliches hohes Gewicht hat ihn von vornherein auf eine besonders für ihn gebaute Straße, die Eisenbahn, verwiesen. Der mechanische Betrieb von Fahrzeugen auf der Straße ist erst praktisch durchführbar geworden durch die Einführung einer neueren Art von Wärmekraftmaschinen: durch den sogenannten Verbrennungsmotor.

2. Verbrennungsmotoren.

a. Allgemeines. Beim Verbrennungsmotor erfolgt die Ausnutzung des Brennstoffs in der Weise, daß die Verbrennung unmittelbar Arbeit liefert; vergaster Kohlenwasserstoff (Petroleum, Gasolin, Ligroin, Benzin, Benzol) wird unter starker Beimischung von Sauerstoff aus der atmosphärischen Luft in dem Arbeitszylinder selbst verbrannt, wobei sofort die zur Bewegung des Kolbens nötige Spannung erzeugt wird; Wärmeerzeugung und -ausnutzung fallen örtlich und zeitlich zusammen; dabei ergibt sich, wie man sagt, ein »hoher thermischer Wirkungsgrad«. Zwar finden auch bei diesen Maschinen noch genug Verluste statt, doch ist die Ausnutzung der Brennstoffe rund doppelt so günstig wie beim Dampf motor. Beispielsweise ist festgestellt,*) daß von 100 pCt. erzeugter Wärme abgeführt wurden: mit den Auspuffgasen 30 pCt., mit dem Kühlwasser 36,7 pCt.; im Zylinder kamen als sogenannte »indizierte Arbeit« 33,3 pCt. zur Verwertung; hiervon leisteten allerdings nur rund 30 pCt. »effektive Arbeit«, da bei diesen Motoren etwas mehr durch Maschinenreibung verloren geht als bei den Dampfmaschinen.

Diese Verbrennungs- oder Explosionsmotoren bedürfen nicht, wie die Dampfmaschine, der »Anheizung«, sie sind jederzeit betriebsbereit, es braucht nur dem Zylinder das zur erstmaligen Explosion nötige Gas-

*) »Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure« a. a. O.

gemisch durch das mit einem Handgriff auszuführende sogenannte Andrehen oder Anwerfen des Motors zugeführt zu werden; sobald durch die erste Explosion einer Zylinderfüllung der Motor in Gang gesetzt ist, besorgt er alles weitere selbst; er stellt sich mit Hilfe des »Vergasers« aus dem Benzin usw. das zu einer Zylinderfüllung nötige Gas jedesmal selbsttätig her, mischt es mit dem richtigen Quantum atmosphärischer Luft, saugt das Gemenge in den Zylinder ein, schafft dort unter starker Erhöhung des Druckes die für eine kräftige Explosion günstigen Bedingungen, betätigt im geeigneten Moment die für die Entzündung des explosiven Gasgemisches bestimmten Organe, leistet unter der Wirkung dieser Explosion Nutzarbeit, stößt die bei der Explosion entstandenen unbrauchbaren Verbrennungsprodukte aus dem Zylinder heraus, sorgt für die Abkühlung der bei der Verbrennung des Gases im Zylinder stark erhitzten Zylinderwände, indem er das Kühlwasser vermittels einer Pumpe zum energischen Umlauf zwingt, außerdem aber den zur Rückkühlung des hierbei erwärmten Kühlwassers bestimmten Kühlapparat durch einen von ihm betätigten Ventilator mit einem kräftigen Luftstrom versieht, sorgt ferner für die Schmierung des Kolbens im Zylinder und aller sonst zu schmierenden Teile, führt dem Vergaser automatisch durch regulierten Druck der Auspuffgase neuen Betriebsstoff zu und sorgt mittels des mit starken Impulsen versehenen Schwungrades für die regelmäßige Wiederholung dieses Spiels: ein wunderbarer Automat, der in der tadellosen Ausführung heutiger Zeit kaum noch der Wartung bedarf.

b. Arbeitsweise. Die Arbeitsweise erfolgt bei der großen Mehrzahl der Verbrennungsmotoren nach dem sogenannten »Viertakt«, d. h., auf vier Kolbenbewegungen (Kolbenhübe) kommt immer nur einer, der Arbeit leistet; wenn der gasdicht im Zylinder bewegliche Kolben seinen ersten »Hingang« macht (sich aus dem Zylinder herausbewegt), so »saugt« er wie der Kolben einer Pumpe (Bild 5), dabei öffnet sich zugleich im Zylinderkopf das »Einlaßventil«, das mit dem Vergaser in Verbindung steht, es tritt also infolge der Saugwirkung im Zylinder fertiges Gasgemisch in diesen ein; beim zweiten Kolbenhub (ersten »Hergang«) geht der Kolben wieder in den Zylinder hinein und preßt dabei die darin befindliche Gasladung stark zusammen; nunmehr wird diese stark komprimierte Ladung elektrisch gezündet, sie »explodiert« und es folgt der dritte Hub (zweite Kolbenhingang), unter der Wirkung dieser Explosion; hierbei wird also Arbeit geleistet, die Kurbelwelle wird gedreht, das daran befindliche Schwungrad erhält einen heftigen Impuls, der es befähigt, die Kurbelwelle während der nächsten (Arbeit verzehrenden) Hübe in Drehung zu erhalten; bei dem folgenden vierten Hub wird der Kolben in den Zylinder hineingedrückt und schiebt dabei die Verbrennungsreste vor sich her und durch den gleichzeitig automatisch geöffneten Auslaß hinaus; nun beginnt, zunächst noch unter der Wirkung der letzten Explosion, d. h. infolge der lebendigen Kraft des weiter rotierenden Schwungrades, das Spiel von neuem; erster Hub: Ansaugen neuen Gasgemisches; zweiter Hub: Kompression dieser Ladung; dritter Hub: Explosion und Arbeitsleistung.

Der Viertaktmotor hat also, wie wir sehen, den Fehler, daß er auf vier Kolbenhübe nur einmal einen Arbeitsimpuls ergibt. Daraus folgt eine große Ungleichförmigkeit der Kurbelumdrehungen, die man dadurch unschädlich gemacht hat, daß man für starke Motoren grundsätzlich vier Zylinder anwendet, deren Arbeitshübe regelmäßig aufeinanderfolgen. (Auf

die wenigen existierenden »Zweitaktmotoren«, bei denen, wie der Name sagt, auf je zwei Hübe ein Impuls kommt, soll hier nicht weiter eingegangen werden, weil sie sich praktisch noch nicht eingebürgert haben.)

c. Beurteilung. Aus der hier kurz skizzierten Konstruktion und Arbeitsweise ergibt sich nun, daß der Verbrennungsmotor doch auch seine Mängel hat. Sie bestehen im wesentlichen in folgendem:

1. Die Maschine ist nicht so einfach und übersichtlich wie eine Dampfmaschinenanlage; wenn sie auch bei der heutigen Vervollkommnung im allgemeinen automatisch arbeitet, so daß sie tatsächlich fast

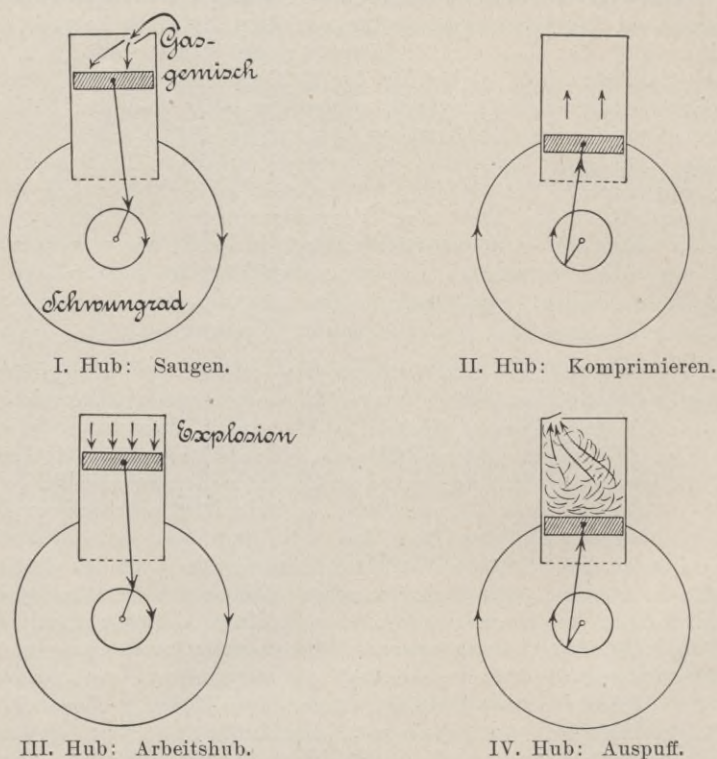


Bild 5.

keiner Wartung bedarf, so ist Einfachheit und Übersichtlichkeit doch eine berechtigte Forderung, weil sonst im Fall einer Störung die Ursache schwer zu finden und die Reparatur schwer auszuführen ist. In dieser Hinsicht steht also der Verbrennungsmotor dem Dampfmotor nach; das bringen die vier Zylinder mit ihren Ventilen, Steuerungen usw. mit sich, und das kann auch nicht gebessert werden. Erst der Zweitaktmotor kann, wenn er fertig ausgebildet ist, eine erhebliche Vereinfachung bringen.

2. Die Betriebssicherheit ist zwar bei den neueren Motoren schon eine recht erhebliche, immerhin ist auch diese Eigenschaft noch nicht auf der bei der Dampfmaschine vorhandenen Höhe; das liegt namentlich an gewissen Mängeln der Gaserzeugung und der Zündorgane, oft auch

an der Schmierung und Kühlung; hier ist aber durch Vervollkommnung der Konstruktion Besserung möglich.

3. Ein guter Motor ist teuer in der Anschaffung und teuer im Betrieb. Die Anschaffungskosten sind aber jetzt im Begriff, sehr herabzugehen, da die Konstruktionen grundsätzlich im allgemeinen feststehen und es somit möglich ist, eine größere Anzahl von Fahrzeugen gleichzeitig herzustellen (sofern Bestellungen genug vorliegen). Die hohen Betriebskosten waren bisher zum großen Teil auf viele Reparaturen zurückzuführen; Beschädigungen entstehen aber meist durch unsachgemäße Behandlung, es ist also Besserung zu erwarten, sobald sich erst bei weiterer Einbürgerung des Kraftwagens ein tüchtiger Wagenführerstand entwickelt haben wird. Reparaturen sind teuer, weil Reserveteile nicht in genügender Zahl vorrätig sind (da fortwährend neue Typen gebaut werden), weil ferner Versandkosten entstehen (nicht jede Fabrik kann die Reparaturen ausführen) und Zeitverluste erwachsen, die auch Geld kosten, namentlich aber, weil das zu verarbeitende Material selbst sowie dessen präzise Bearbeitung recht kostspielig ist. In diesen Punkten ist ein merklicher Fortschritt nur möglich, wenn ein und derselbe Typ in großer Zahl gefertigt wird, so daß Ersatzstücke so billig und bequem zu haben sein würden wie etwa bei Fahrrädern, Nähmaschinen usw. Der Betrieb ist aber auch teuer wegen des teuren Betriebsstoffes! Für einen sicheren Betrieb hatte sich Benzin bisher weitaus am besten bewährt; der Verbrauch an Benzin war daher stark gestiegen und demgemäß auch der Preis. Die Versuche, an Stelle von Benzin Spiritus zu verwenden, haben beim Kraftwagen, im Gegensatz zu den günstigen Erfahrungen beim Stationärmotor, keine sehr erfreulichen Ergebnisse gezeitigt. Neuerdings nimmt die Verwendung von Benzol, das viel billiger ist, an Verbreitung zu; die Frage des Benzolbetriebes ist technisch so gut wie gelöst. Es steht also eine Verbilligung des Betriebes auch in dieser Hinsicht in sicherer und naher Aussicht; allerdings wird damit zu rechnen sein, daß die Benzolpreise ebenfalls bei zunehmender Nachfrage in die Höhe gehen werden, zumal auch die Herstellung tatsächlich kostspieliger werden dürfte, sobald Benzol nicht nur als Nebenprodukt erzeugt wird, sondern zum Selbstzweck hergestellt werden muß. Die hohen Preise, die 1907 für Benzin gezahlt werden mußten, werden aber wohl nie erreicht werden.

4. Ein weiterer Nachteil des Verbrennungsmotors war bisher, wenigstens bei Anwendung schwacher Motoren, d. h. solcher, die gerade nur die theoretische Höchstleistung ergaben, die in ihrem Betriebe vorkam, die Unmöglichkeit, den Motor zu überlasten. Es ist zufolge der Eigenart des Verbrennungsmotors tatsächlich nicht möglich, die Leistung, falls sie einmal bei schwierigen Wegstellen nicht ausreicht, in nennenswertem Maße zu steigern. Bei Überlastung bleiben Verbrennungsmotoren stehen. Man hat diesem Mangel dadurch abgeholfen, daß man in jedem Fall von vornherein einen so starken Motor wählt, daß er unter allen Umständen bei allen auf seinen Fahrstraßen vorkommenden Bewegungswiderständen nicht nur ausreichen muß, sondern noch einen großen Kraftüberschuß hat. Infolge der Regulierfähigkeit der neueren Verbrennungsmotoren ist es dann möglich, überall da, wo die volle Leistung nicht verlangt wird, mit »abgedrosseltem« Motor zu fahren, so daß der Brennstoffverbrauch, der ja allerdings bei unvollkommen ausgenutztem Motor verhältnismäßig hoch wird, sich doch noch in mäßigen Grenzen hält.

Trotz dieser gewiß nicht unerheblichen Nachteile ist der Verbrennungsmotor doch der einzige, dem als selbständigem Fahrzeugmotor wirklich

große Bedeutung beizumessen ist. Er hat bekanntlich als Motor für Personenkraftwagen geradezu erstaunliche Leistungen aufzuweisen. Auf kleinstem Raum sind Motoren von 100 und mehr Pferdestärken untergebracht, das Gewicht pro Pferdestärke ist fortgesetzt vermindert worden, es gibt bereits Motoren, die pro Pferdestärke nur noch etwa 2 kg wiegen, die Betriebssicherheit ist schon so weit gebracht, daß Fahrzeuge bei einem Durchschnittstempo von 80 km und mehr in der Stunde mehrere Stunden hintereinander fahren können, wobei dem Motor infolge der heftigen Fahrerschütterungen ganz außerordentliche Beanspruchungen zugemutet werden. Nach solchen Leistungen darf zum mindesten nicht bezweifelt werden, daß dem Verbrennungsmotor eine Entwicklungsfähigkeit innewohnt, die zu der Hoffnung berechtigt, daß er auch im Lastkraftfahrzeug allen gerechten Forderungen wird entsprechen können. Hinsichtlich des »Aktionsradius« ist er dem Dampfmotor wesentlich überlegen; ein Lastkraftwagen mit Verbrennungsmotor vermag Betriebsstoff für etwa 200 km Fahrstrecke mitzuführen, kann also auf recht weite Fahrt geschickt werden, ohne daß man sich darum zu kümmern braucht, ob er irgendwo ein Betriebsstofflager finden wird.

Zu erwähnen ist bei dieser Gelegenheit, daß man im Hinblick auf die große Bedeutung, die zweifellos dem Lastkraftwagen mit Verbrennungsmotor für die zukünftige Entwicklung beizumessen ist, sich entschlossen hat, seine Einführung von seiten des Staates zu unterstützen. Es werden sowohl für die Beschaffung wie für den Betrieb und die Unterhaltung von Lastkraftfahrzeugen gewisser bewährter Bauarten Unterstützungen und Prämien bewilligt. Die Gesamtkosten eines solchen Betriebes werden dann voraussichtlich geringer werden als beim Pferdebetrieb. Bei solcher Erleichterung dürften sich in nächster Zeit viele Betriebsunternehmer entschließen, den Lastkraftwagen, unter Einschränkung der Zahl ihrer Gespanne, einzuführen.

Die Gruppe der Fahrzeugmotoren, welche die in der Kohle oder den Kohlenwasserstoffen aufgespeicherte Wärme zur Erzeugung von Arbeit verwerten, ist hiermit für den vorliegenden Zweck hinreichend skizziert.

B. Elektrischer Antrieb.

1. Allgemeines.

Als zweite Gruppe hatten wir die durch Elektrizität getriebenen Fahrzeuge bezeichnet.

Was die elektrischen Motoren betrifft, so sind sie an sich ideale Fahrzeugmotoren; sie sind äußerst einfach, daher auch sehr leicht zu bedienen, sehr elastisch, können vorübergehend hoch überlastet werden und haben den großen Vorzug der direkten Rotation, d. h. sie haben keine hin- und hergehenden Teile, die ja immer unerwünschte Erschütterungen und Schwingungen erzeugen, sondern geben unmittelbar drehende Bewegung, wie sie auf die Räder übertragen werden kann. Die technische Schwierigkeit der Anwendung liegt nur in der Zuführung des elektrischen Stromes.

2. Gleislose elektrische Bahnen.

Es ist bereits erwähnt worden, daß es elektrisch betriebene Fahrzeuge gibt, deren Motoren den Strom aus oberirdischen Leitungen erhalten, ganz

ähnlich wie die Straßenbahnen, und daß solche Fahrzeuge an diejenigen Straßen gebunden sind, die mit den erforderlichen Stromzuführungseinrichtungen versehen sind. Diese Beschränkung ihrer Bewegungsfreiheit ist unter gewissen Umständen sicher zulässig, wenn es sich, wie schon angedeutet, um lokal begrenzte Transporte handelt, denen diese Fahrzeuge dienen sollen, also um eine Art Kleinbahn, die lediglich auf einer und derselben Strecke hin und her zu fahren hat. In der Regel versteht man aber unter Lastkraftfahrzeugen im Sinne unserer Erörterungen Fahrzeuge, die an keine Straße gebunden sind, sondern volle Bewegungsfreiheit haben. Wir können daher auch hier davon absehen, näher auf das System der »gleislosen Bahnen«, dies ist der Name, den man dem System gegeben hat, einzugehen.

3. Fahrzeuge mit Akkumulatorbetrieb.

Zur Speisung der Elektromotoren auf frei beweglichen Wagen, die also nicht an solche bestimmten Fahrstrecken gebunden sind, wird bei der überwiegenden Mehrzahl der elektrischen Fahrzeuge nur die Akkumulatorbatterie angewendet. Die Nachteile der Akkumulatoren sind genugsam bekannt; sie sind außerordentlich schwer, haben eine sehr mäßige »Kapazität«, nach dem Verbrauch ihrer Energie ist ein mehrstündiges »Laden« erforderlich, und dieses Laden erheischt besondere Einrichtungen, die keineswegs überall anzutreffen sind. Der elektrische Lastkraftwagen kommt daher, sofern er zur Speisung der Elektromotoren des Akkumulators bedarf, nur für städtische Betriebe in Betracht, wo die Gelegenheit zum Erneuern der Akkumulatorladung leicht gefunden werden kann. Für unsere Betrachtungen muß auch diese Art elektrischer Fahrzeuge ausscheiden.

4. Das gemischte System.

Die glänzende Entwicklung der Verbrennungsmotoren hat aber in den letzten Jahren die Verwirklichung des Gedankens ermöglicht, die Erzeugung des elektrischen Stromes auf dem fahrenden Fahrzeug selbst vorzunehmen, indem ein solcher Motor mit einer Dynamomaschine verbunden wird, die den erzeugten Strom in die Elektromotoren schickt. Wird es aber zweckmäßig sein, ein solches System, das sogenannte »gemischte System«, praktisch anzuwenden? Die ganze Anlage muß ohne Zweifel recht teuer werden; man wird sie also nur da anwenden, wo mit den gewöhnlichen Mitteln nicht auszukommen ist, oder wo die Kostenfrage keine wesentliche Rolle spielt gegenüber den erzielten Vorteilen oder Annehmlichkeiten. So ist es denn auch in der Tat. Das gemischte System wird in neuerer Zeit bei Luxuspersonenkraftwagen angewendet, weil es die große Annehmlichkeit bietet, sehr geräuschlos zu arbeiten und die Führung des Wagens im großstädtischen Straßenverkehr sehr zu erleichtern; diese Vorteile sind groß genug, um bei Luxuswagen die Anwendung des gemischten Systems zu rechtfertigen. Bei einzeln fahrenden Lastkraftwagen würde sich dagegen die kostspielige Anlage nicht lohnen; auch würde sie die Ladefläche, auf die es doch zur Ausnutzung eines wertvollen Kraftwagens sehr ankommt, zu sehr beschränken, weil die Unterbringung der Dynamo mehr Platz beansprucht als die des bekannten Getriebes bei gewöhnlichen Kraftwagen. Vor allem aber liegt beim Einzelwagen auch gar kein Bedürfnis vor, zum elektrischen Antrieb zu greifen; das bekannte Zahnradgetriebe des Automobils hat sich für den Antrieb der zwei Hinterräder des Einzelwagens als ausreichend erwiesen

und gut bewährt. Wir werden aber im Verlauf unserer Betrachtungen sehen, daß es Aufgaben für den mechanischen Betrieb von Lasttransporten auf Straßen gibt, deren Bewältigung mit dem gewöhnlichen Einzelwagen oder mit dem Antrieb von nur zwei Rädern einfach nicht mehr möglich ist; solche Aufgaben zwingen, wie wir erkennen werden, zur Anwendung von zusammenhängenden Zügen, die auf Straßen nur dann vorwärtskommen können, wenn möglichst viele Räder des ganzen Zuges angetrieben werden (s. S. 20); für die Übertragung der Kraft des Motors auf diese große Anzahl von Rädern gibt es aber kein besseres Mittel als den elektrischen Antrieb. Hier also ist der elektrische Antrieb aus technischen Gründen durchaus am Platz, ja das allein richtige und mögliche; hier ist aber ferner auch die Möglichkeit gegeben, diese teure Anlage rentabel zu machen, denn ein solcher Lastzug befördert ja auch auf einmal eine sehr erhebliche Menge Nutzlast. Unsere späteren Erörterungen sollen näher untersuchen, inwieweit die Verhältnisse tatsächlich zum Betrieb mit solchen elektrischen Zügen zwingen können und ob mit einer



Bild 6. Lastzug mit elektrischer Kraftübertragung.

Rentabilität dieses Betriebes zu rechnen sein wird. Es sei nur vorweg bemerkt, daß es sich hier nicht mehr um ein Zukunftssystem handelt, sondern solche Konstruktionen tatsächlich bereits mit großem Erfolg praktisch ausgeführt worden sind (Bild 6).

III. Leistungsfähigkeit.

A. Allgemeines.

Bei der Erwägung, welches System im Einzelfall für einen großen Betrieb zu beschaffen ist, wird, abgesehen vom Kostenpunkt, demjenigen der Vorzug gegeben werden, das, allgemein gesagt, am »leistungsfähigsten« ist. Wenn wir hier von großen Betrieben sprechen, so ist zu bedenken, daß das Kraftfahrzeug ja in erster Linie für solche in Betracht kommt. Es wird naturgemäß vor allem da am Platze sein, wo große Transportaufgaben vorliegen, die mit Pferdefahrzeugen vielleicht überhaupt nicht mehr zu bewältigen sind (weil die Fahrstrecken zu lang sind, zu viel Pferde auf einmal gebraucht werden und dergleichen); nicht immer ist ja die Möglichkeit vorhanden, für solche Fälle eine Eisenbahn zu schaffen, der Kraftfahrzeugbetrieb wird dann die Aufgabe übernehmen müssen. Erst in zweiter Linie wird man den Kraftwagen auch für kleinere Aufgaben einsetzen, wenn er nämlich wegen seiner Schnelligkeit Vorteile anderer Art verspricht.

Betrachten wir nun das Verhalten der verschiedenen Systeme in denjenigen Fällen, wo es sich um Bewältigung von Massentransporten handelt. Die hierbei zu berücksichtigenden Faktoren werden am einfachsten durch Zahlen erklärt; wir führen im nachstehenden eine Rechnung aus, die unseres Wissens zuerst Douhet*) bekannt gegeben hat.

B. Faktoren der Massenförderung.

Da bei Massentransporten auf jeden Fall eine längere »Kolonne« von Lastkraftwagen in Betracht zu ziehen ist, deren Beaufsichtigung und Zusammenhalten Schwierigkeiten macht, spielt dabei auch die Länge jedes einzelnen Fahrzeuges eine gewisse Rolle. Der auf den einzelnen Wagen entfallende Teil der Kolonnenlänge setzt sich aus folgenden Werten zusammen: aus dem Wagen selbst, dem »Vorspann« und dem Abstand der Wagen untereinander. Man bezeichne diese ganze Länge mit L . Hat man eine Anzahl von X Wagen, jeder L m lang (alles in allem), so ist die Länge der ganzen Kolonne: $X \cdot L$ Meter. Es sei ferner die gesamte zurückzulegende Wegestrecke gleich S (m) und die Fahrgeschwindigkeit gleich V (hier ausnahmsweise in Metern in der Stunde ausgedrückt, weil auch $X \cdot L$ in Metern angegeben ist). Die Fahrzeit, die der erste Wagen braucht, um die ganze Strecke S mit der Geschwindigkeit V zurück-

zulegen, ist $= \frac{S}{V}$ (Std.). Da für den letzten Wagen noch die Länge der Kolonne ($= X \cdot L$) als Fahrstrecke hinzukommt, so ist für ihn die Gesamtstrecke $= S + X \cdot L$ und die Gesamtfahrzeit $t = \frac{S}{V} + \frac{X \cdot L}{V}$.

Bei gegebener Gesamtlast und gegebener Tragfähigkeit der Wagen sowie gegebener Weglänge kann man an den Werten X und S nichts ändern. V ist bei Lastwagen bestimmter Art ebenfalls eine gegebene Größe;

*) V. Atti della Associazione elettrotecnica italiana, 1901, S. 254 f.

leichte Wagen können schnell fahren, schwere nur langsam, wenn sie nicht in kurzer Zeit ruiniert werden und ihrerseits die Straße ruinieren sollen. Will man nun bei gegebenen Fahrzeugen die Fahrzeit t abkürzen, so bleibt nur übrig, L so niedrig wie möglich zu halten, d. h. die Länge der einzelnen Transporteinheit selbst einschließlich des Abstandes zwischen zwei Einheiten. Ein geringer Abstand ist aber nur möglich, wenn die einzelnen Einheiten nur mäßige Geschwindigkeit haben, die zudem leicht regulierbar sein muß. Liegt somit ein Bedürfnis vor, die Fahrgeschwindigkeit V zu beschränken, so entspringt daraus offenbar ein Interesse daran, diesen Nachteil nun wenigstens dadurch auszugleichen, daß jede einzelne Transporteinheit so groß gemacht wird, wie es die Fahrgeschwindigkeit irgend zuläßt; dadurch verringert sich dann die Zahl der Einheiten X ; gleichzeitig wird L (wegen der bei mäßiger Geschwindigkeit statthafter geringen Abstände) verringert, aber nur bis zu einer gewissen Grenze; es wächst dann wieder, weil die Transporteinheit selbst länger wird.

Die Wechselwirkung der Werte X , L und V wird am besten durch einige Beispiele erläutert.

Rechenbeispiele.

Gegeben sei: Die Strecke (S) = 50 km, die zu befördernde Last = 300 ts (300 000 kg).

7. Frage: Wie lange braucht eine Kolonne von Pferdefahrzeugen, um die gesamte Last an die Zielstation zu bringen?
Wieviel Wagen, Pferde und Mannschaften braucht sie?

Es trage jeder Wagen, wie es durchschnittlich angenommen werden kann, 1000 kg = 1 t; man braucht dann 300 Wagen; es ist also $X = 300$. Zu den 300 Wagen gehören aber mindestens 300 Mann und 600 Pferde. Die Marschgeschwindigkeit in der Kolonne sei 4 km pro Stunde ($V = 4000$). Die Länge eines mit Pferden bespannten Wagens werde zu 7 m angesetzt, der Abstand zwischen den Fahrzeugen = 5 m, also $L = 7 + 5 = 12$ m. Es ist nun nach unserer Formel

$$t = \frac{S}{V} + \frac{X \cdot L}{V} = \frac{50\,000}{4000} + \frac{300 \cdot 12}{4000} = 12,5 + 0,9,$$

d. h. nach 12,5 Stunden trifft der erste Wagen ein und nach weiteren 0,9 Stunden oder 54 Minuten der letzte. Zu der reinen Fahrzeit müssen aber noch etwa 2 $\frac{1}{2}$ Stunden für Futterpausen zugeschlagen werden, also 15 Stunden. Für die 600 Pferde und 300 Mann müssen ferner wenigstens 2000 kg Verpflegungsmittel mitgeführt werden (= 2 Wagenladungen). Die Kolonne beansprucht 3600 m Straßenlänge.

8. Frage: Was ergibt sich unter gleichen Verhältnissen bei Verwendung von leichten Lastkraftwagen (mit 2000 kg Tragfähigkeit)?

Die Zahl der Wagen (X) geht auf 150 herab, der Personalbedarf bleibt jedoch = 300 Mann. Die Marschgeschwindigkeit solcher Wagen muß, wenn ihre Eigenschaften überhaupt ausgenutzt werden sollen, zu 20 km pro Stunde angenommen werden (sie laufen auf Vollgummireifen); also $V = 20\,000$. Die Länge eines solchen Kraftwagens ist etwa gleich 5 m anzunehmen. Die erhebliche Geschwindigkeit solcher Fahrzeuge

zwingt dazu, selbst bei vorzüglich ausgebildetem Fahrpersonal die Abstände von Wagen zu Wagen nicht unter 40 m zu nehmen, weil sie sonst ineinanderrennen würden, sobald irgendwo im vorderen Teil der Kolonne ein Stocken eintritt, was infolge eines Fahrthindernisses oder einer schlechten Wegstelle leicht vorkommen kann.

Es wird also $L = 5 + 40 = 45$, und wir erhalten:

$$t = \frac{50\,000}{20\,000} + \frac{150 \cdot 45}{20\,000} = 2,5 + 0,33 \text{ Stunden,}$$

d. h., der erste Wagen trifft nach $2\frac{1}{2}$ Stunden, der letzte um 0,33 Stunden oder rund 20 Minuten später ein. Die Kolonne wird 6750 m lang. Nimmt man etwas bewegtes Gelände an, wo die Abstände noch größer genommen werden müssen (beispielsweise hat man bei Versuchen, um sicher zu gehen, bis 100 m Abstand gehalten), so ergeben sich ganz außerordentliche Kolonnenlängen (15 km und mehr).

Kraftwagen so leichter Art bieten also jedenfalls hinsichtlich der anzustrebenden Verkürzung der Kolonne keine Vorteile; dagegen geht die Fahrzeit erheblich herab (von $12\frac{1}{2}$ oder 15 Stunden auf nur $2\frac{1}{2}$ Stunden), und der letzte Wagen kommt trotz der großen Kolonnenlänge nur 20 Minuten später am Ziel an als der erste.

Bei den großen Abständen, mit denen die Wagen fahren müssen, kann man hier eigentlich kaum noch von einer Kolonne reden. Beaufsichtigung und Zusammenhalt ist nicht möglich; auch besteht die Gefahr, daß an Straßenkreuzungen zum Teil falsche Wege eingeschlagen werden, wenn die Geländegestaltung oder die Staubentwicklung die Übersicht erschwert, oder wenn bei Nacht gefahren werden muß. Vom militärischen Standpunkt würde eine solche »Kolonne« sehr bedenklich sein; in die großen Lücken würden sich andere Fahrzeuge, die in gleicher oder entgegengesetzter Richtung zahlreich auf der Straße verkehren, einschleichen und die Automobilkolonne auseinanderreißen; es wäre wohl sehr zweifelhaft, ob der Transportführer seine Fahrzeuge überhaupt alle ans Ziel zu bringen vermöchte. Jedenfalls würden zahlreiche Hemmnisse den Vorteil der großen Schnelligkeit ganz illusorisch machen.

9. Frage: Wie stellt sich die Sache bei Verwendung von schweren Lastkraftwagen, d. h. solchen, deren Gewicht die zulässige Höchstgrenze erreicht?

Beschränken wir uns mit dieser Höchstgrenze auf 7500 kg Gesamtgewicht des Wagens, so würden wir nicht mehr als 4000 kg Nutzlast annehmen können; wir dürfen aber, wie oben ausgeführt, bis 9000 kg Gesamtgewicht zulassen; ein solches Fahrzeug kann bei Verwendung guten Baumaterials und bei vorzüglicher Konstruktion etwa 5000 kg Nutzlast tragen.

Trägt jeder Wagen 5 t, so wird die Zahl der Wagen $(X) = \frac{300}{5} = 60$.

An Personal sind 120 Mann erforderlich. Die Marschgeschwindigkeit solcher Wagen darf, beladen, auf nicht mehr als 10 km pro Stunde angenommen werden ($V = 10\,000$). Die Länge des Wagens ist etwa 5 m, der Abstand der Wagen wird unter mittleren Betriebsverhältnissen zu 30 m angesetzt werden können; die schweren Fahrzeuge haben bei 10 km Geschwindigkeit eine erhebliche lebendige Kraft, sowohl das Verlangsamten

wie das Beschleunigen der Fahrt erfordert eine gewisse Zeit; es ist also Vorsicht geboten, wenn Unglücksfälle vermieden werden sollen. Hiernach wird also der Wert $L = 35$ m. Dann ist

$$t = \frac{50\,000}{10\,000} + \frac{60 \cdot 35}{10\,000} = 5 + 0,21,$$

d. h. der erste Wagen trifft nach 5 Stunden ein, der letzte 12 Minuten später. Die Kolonne wird 2100 m lang; eine geringe Verkürzung der Kolonne wird also mit Fahrzeugen dieser Art bereits erreicht. Ferner tritt ein erheblicher Zeitgewinn gegenüber den Pferdekolonnen ein (5 Stunden gegen 15). Die Kolonne ist weniger unübersichtlich als eine solche aus »leichten« Lastkraftwagen, immerhin sind die großen Abstände von Wagen zu Wagen, die sich unter Umständen sogar noch sehr erweitern können, störend; sie können trotz eifriger Bemühungen des Aufsichtspersonals bei der Länge von über 2 km immer noch Veranlassung geben, daß sich andere Fahrzeuge, die etwa der Kolonne begegnen, in diese Lücken einschieben und Stockungen hervorrufen. Eine weitere Verkürzung und Zusammenschiebung der Kolonne wäre jedenfalls erwünscht.

10. Frage: Was ergibt sich, wenn ein sogenannter »leichter Lastzug« verwendet wird (d. h., ein Lastkraftwagen der vorigen Art, dem aber noch ein gewöhnliches Fahrzeug von 5 t Tragfähigkeit angehängt ist)?

Jeder Zug befördert dann 10 t, die 300 t Nutzlast erfordern also 30 leichte Züge. X wird = 30. An Personal werden 90 Mann gebraucht (pro Zug 3). Lastzüge dieser Art sind, wie erwähnt, in der Regel imstande, den Inhalt eines Eisenbahnwaggons auf einmal ab- oder anzufahren. Es wurde schon hervorgehoben, daß viele Interessenten gerade diese Art von leichten Lastzügen zu beschaffen wünschen, während für Einzelwagen oder Züge mit geringerer Nutzlast ein Interesse nicht in gleichem Maße im Publikum vorhanden ist. Auch für einen kolonnenweisen Abtransport von der Bahn hat das System große Vorzüge, weil die Umladung sehr vereinfacht wird. Dieser Typ verdient daher besondere Beachtung. Jeder Zug wird etwa 11 m lang, die Abstände zwischen den einzelnen Zügen können zu etwa 15 bis 20 m angenommen werden; rechnen wir der Einfachheit halber 19 m, so ergibt sich ein L von 30 m. Die Geschwindigkeit ist auf 8 km pro Stunde zu ermäßigen, $V = 8000$ m/Std. Dann wird

$$t = \frac{50\,000}{8000} + \frac{30 \cdot 30}{8000} = 6,2 + 0,11 \text{ Stunden,}$$

oder: der erste Zug braucht 6 Stunden und 12 Minuten, der letzte kommt 6 bis 7 Minuten später an. Die Kolonne wird jetzt nur $30 \cdot 30 = 900$ m lang, d. h. gleich $\frac{1}{4}$ der bespannten Kolonne. Dieser Vorteil ist sehr wesentlich; er erleichtert die Beaufsichtigung sehr. Die Gesamtfahrzeit ist kürzer als die Hälfte derjenigen der bespannten Kolonne. Eine derartige mechanische Kolonne bedeutet also gegenüber der mit Pferden bespannten schon einen ganz erheblichen Fortschritt, sowohl hinsichtlich der Fahrzeit als auch hinsichtlich der Kolonnenlänge. Dieselbe Transportleistung, die bei Pferdefahrzeugen 300 Wagen mit 300 Mann und 600 Pferden erfordert, die eine Strecke von 3600 m auf der Straße in Anspruch nehmen, wird hier mit nur 30 kurzen Zügen mit 90 Mann Fahrpersonal bewältigt, die nur 900 m Straßenlänge bedecken.

11. Frage: Dasselbe zu ermitteln für einen Lastzug, der von einer Straßenlokomotive gezogen wird:

- a) bei zwei Anhängewagen mit je 5 t Nutzlast;
- b) bei zwei Anhängewagen mit zusammen 15 t Nutzlast?

Zu a: Bei 10 t Nutzlast pro Zug sind für 300 t wiederum 30 Züge nötig; $X = 30$. Der Personalbedarf ist $30 \cdot 4 = 120$ Mann. Der Zug wird einschließlich Lokomotive etwa 20 m lang, der Abstand der Züge untereinander braucht nur 15 m zu betragen, da die Marschgeschwindigkeit solcher Züge nur 5 km pro Stunde erreicht. L wird somit gleich $15 + 20 = 35$ m; $V = 5000$.

$$t = \frac{50\,000}{5000} + \frac{30 \cdot 35}{5000} = 10 + 0,21,$$

d. h., der erste Zug trifft nach 10 Stunden ein, der letzte 12 bis 13 Minuten später. Die bei Dampflokomotiven unvermeidlichen Aufenthalte für Wassernehmen, die dadurch, daß die 30 Lokomotiven nicht alle gleichzeitig an die Wasserstelle herankommen können, sich ziemlich zeitraubend gestalten, werden die Marschzeit auf etwa 13 Stunden erhöhen. Die Kolonne wird 1050 m lang. Wir erreichen also gegenüber der Pferdekolonnie zwar eine erhebliche Verkürzung, aber fast gar keinen Zeitgewinn.

Zu b: Bei 15 t Nutzlast pro Zug sind nur $\frac{300}{15} = 20$ Züge erforderlich mit $20 \cdot 4 = 80$ Mann Bedienung; $X = 20$. Die Länge des Zuges beträgt ebenso wie zu a etwa 20 m. Die Marschgeschwindigkeit ist nur etwa 4 km pro Stunde; $V = 4000$. Demgemäß kann der Abstand von Zug zu Zug auf etwa 12 m ermäßigt werden. L wird somit $= 20 + 12 = 32$ m.

$$t = \frac{50\,000}{4000} + \frac{20 \cdot 32}{4000} = 12,5 + 0,16$$

oder: der erste Zug kommt nach $12\frac{1}{2}$ Stunden an, der letzte 10 Minuten darauf. Die Kolonne wird 640 m lang. Diese Verkürzung ist ohne Zweifel von großem Wert, leider steht ihr das schlechte Zeitresultat gegenüber, daß die Fahrzeit, wenn man die Aufenthalte für Wassernehmen berücksichtigt, etwa dieselbe ist wie bei der Pferdekolonnie, also ein Zeitgewinn überhaupt nicht mehr vorhanden ist.

Diese beiden Beispiele sind jedoch, worauf ausdrücklich hingewiesen sei, zur Zeit nicht praktisch realisierbar, wenigstens nicht auf den normalen Straßen; Straßenlokomotiven, die solche Lasten ziehen sollen, müssen, sofern es sich nicht um vorwiegend ebene Straßen handelt, Eigengewichte erhalten, die nach den früheren Ausführungen nicht ohne weiteres zum Verkehr auf Straßen zugelassen werden.

12. Frage: Welche Verhältnisse ergeben sich bei Verwendung von Lastzügen mit elektrischer Kraftübertragung (bei denen also die Anhängewagen nicht »gezogen« werden, sondern nur zum Zweck der Lenkung mit dem vordersten Wagen

verbunden sind, von dem sie zugleich ihre elektrische Energie erhalten — s. S. 32)?

Ein solcher Zug würde eine Nutzlast von 30 t aufnehmen können; es werden also für 300 t nur 10 Züge gebraucht. $X = 10$. An Personal sind 80 Mann erforderlich (2 auf dem Kraftwagen, je 1 auf den 6 Anhängern, zusammen 8 pro Zug). Die Länge des Zuges sei 40 m. Der Abstand der Züge untereinander braucht bei der hohen Regulierfähigkeit der elektrischen Übertragung nur 20 m zu betragen. $L = 60$. Die Geschwindigkeit kann eine verhältnismäßig große sein, da die Last auf viele Achsen verteilt ist, somit keine großen Einzelraddrücke auftreten; sie kann zu 10 km/Std. angenommen werden. $V = 10\ 000$. Dann ergibt sich

$$t = \frac{50\ 000}{10\ 000} + \frac{10 \cdot 60}{10\ 000} = 5 + 0,06,$$

d. h., der erste Zug trifft in 5 Stunden ein, der letzte $3\frac{1}{2}$ Minuten später. Die Kolonne ist jetzt nur noch 600 m lang.

Es erscheint angezeigt, die Leistungsfähigkeit des elektrischen Zuges noch weiter darzutun, indem eine noch schwierigere Aufgabe für einen derartigen Zug besprochen wird.

Nehmen wir an, die gedachten großen Transportaufgaben seien in einem Gebiet auszuführen, wo Eisenbahnen fehlen, aber fahrbare Straßen zur Verfügung stehen. Es sei die Aufgabe gestellt, eine 320 km entfernte Zielstation täglich mit Gütern im Gewicht von 300 t zu versehen. Legen wir den elektrischen Zug zugrunde, der 30 t Nutzlast trägt, so müßten täglich am Ziel 10 solche Züge mit je 30 t Nutzlast eintreffen. Ein derartiger Zug kann täglich, beladen, mit voller Sicherheit, wenn die Straße in normalem Zustande ist, 80 km fahren, wobei sich bei zehnstündigem Betrieb eine Stundengeschwindigkeit von 8 km ergeben würde.*) Der Zug braucht dann für die 320 km lange Fahrstrecke 4 Tage Fahrzeit (gegenüber 2 bis 3 Tagen unter günstigen Umständen). Wenn also auf der Zielstation keine Unterbrechung im Eintreffen der Güter eintreten soll, so müssen 4 Serien von elektrischen Zügen dauernd auf der Hinfahrt unterwegs sein, in Abständen von einem Tagesmarsch, jede Serie in einer Stärke von 10 Zügen. Als Formel**) ausgedrückt: Ist W die Länge des Gesamtweges und E die einer Tagesetappe, x die Zahl der Wagen auf jeder Tagesstrecke, so ist $\frac{W}{E}$ die Zahl der Etappen und

$\frac{x \cdot W}{E}$ die Gesamtzahl der auf der Hinfahrt befindlichen Züge. Da ebensoviel Züge dauernd auf der Rückfahrt begriffen sein müssen, so ergibt sich, daß zur Durchführung eines solchen Betriebes eine Gesamtzahl $Z = \frac{2 \cdot x \cdot W}{E}$ gebraucht wird. Der Wert dieses Bruchs wird offenbar um so kleiner, je größer der Nenner E , die Länge der täglichen Etappe,

*) Der Zug kann natürlich unter günstigen Verhältnissen noch mehr leisten; er erreicht eine Geschwindigkeit von 12 km pro Stunde; da er (mit wechselndem Personal) auch 15 Stunden und noch länger im Betrieb sein kann, läßt sich die Leistung auf 150 km und mehr steigern.

**) Atti a. a. O. S. 255f.

wird. Somit besteht ein Interesse daran, nur solche Systeme zu verwenden, die es ermöglichen, große Tagesetappen zu fahren. Je größer die Tagesetappen, desto geringer der Wagenpark und damit auch das für einen mechanischen Betrieb investierte Kapital. Man kann auch schreiben:

$$W = \frac{Z \cdot E}{2 \cdot x},$$

d. h.: bei gleichbleibender Gesamtwagenzahl Z und ebenfalls gleichbleibender Wagenzahl x pro Tagesetappe wird die Gesamtförderweite W um so größer, je größer E , die Tagesetappenlänge, wird. Es muß also für starke Transporte auf große Entfernungen die Forderung gestellt werden: Große Tagesetappen!

Solche langen Etappen erfordern Fahrzeuge, die ziemlich schnell fahren und deren Motoren unermüdlich den ganzen Tag arbeiten, dabei ihre Kraftquelle an Bord mitführen und keine größeren Pausen zur Aufnahme von Betriebsstoffen verlangen, d. h., an und für sich einen großen Aktionsradius haben. Diese Eigenschaft muß man also von einem Kraftfahrzeug verlangen, das für große Transportaufgaben bestimmt ist. Dazu gehört: große Betriebssicherheit und Ausdauer des ganzen Mechanismus und ein mäßiger Brennstoffverbrauch. Die Maschinerie muß eben ohne sorgfältige Wartung und ohne erheblichen Verschleiß wie ein Uhrwerk mit größter Regelmäßigkeit arbeiten. Bei einer häufigen Wiederholung von Betriebsstörungen wird ja nicht nur das betroffene Fahrzeug stillgelegt, sondern die ganze Kolonne muß mit warten, wenn sie nicht auseinandergerissen werden soll; unter solchen Umständen könnten natürlich keine großen Tagesetappen erreicht werden. Auch die Forderung, daß der Motor nicht viel Brennstoff verzehren darf, ist unerlässlich, weil sonst bei so langen Fahrstrecken die Mitführung großer Mengen von Brennstoff nötig würde, was nur auf Kosten der »Nutzlast« möglich wäre. Es kommt aber nicht darauf an, Kohlen und Wasser oder Benzin zu transportieren, sondern Nutzgüter.

Einen großen Aktionsradius haben nur die Verbrennungsmotoren. Nur ein solcher kann daher als primäre Kraftquelle in Betracht kommen. Beim elektrischen Zuge ist das der Fall; der Benzinmotor treibt die Dynamo an, die den Strom für die elektrische Kraftübertragung liefert. Der Dampfmotor kann hier nicht konkurrieren. Er kommt nur da in Betracht, wo es sich um geringe Entfernungen handelt, die er mit einmaliger Ladung von Betriebsstoffen zurücklegen kann, und wo ferner keine große Geschwindigkeit verlangt wird.

Natürlich liegt nun die Frage nahe, ob für die angenommene Aufgabe des täglichen Transports von 300 t auf 320 km nicht die einfachen Lastkraftwagen oder die mit einem Anhänger versehenen Fahrzeuge dieser Art ebenso gut geeignet sind wie der elektrische Zug, da sie ja ebenfalls große Tagesetappen leisten und denselben Benzinmotor mit großem Aktionsradius haben. Gewiß sind sie ebenso und sogar besser geeignet, wenn es sich nur um geringe Einzelleistungen, z. B. gelegentlichen Transport einiger Wagenladungen handelt. Dabei treten die Vorteile der größeren Geschwindigkeit beim Einzelfahren mehr hervor, während die Überlegenheit des elektrischen Zuges bei Bewältigung von Massentransporten nicht zur Geltung kommen würde. 300 t Nutzlast erfordern, wie wir früher sahen, 60 Einzelwagen oder 30 »leichte Züge«; dazu gehört ziemlich viel Personal, und die Kolonnen werden sehr viel länger als bei

10 elektrischen Zügen. Die Zahl der Transporteinheiten ist bei »leichten Zügen«

$$\frac{2 \cdot x \cdot W}{E} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 320}{80} = 240,$$

bei Einzelwagen

$$= \frac{2 \cdot 60 \cdot 320}{100} = 384;$$

letztere Zahl bedeutet ein großes Anlagekapital, denn ein Einzelwagen kostet 18 000 M, 384 Stück würden also einen Aufwand von 6 912 000 M erfordern; ein »leichter Zug« kostet 18 000 + 2000 = 20 000 M, 240 Züge also doch nur 4 800 000 M. Bei Verwendung elektrischer Züge haben wir: $Z = \frac{2 \cdot 10 \cdot 320}{80} = 80$; ein Zug kostet bei Serienfabri-

kation etwa 90 000 M, somit sind hier 7 200 000 M aufzuwenden, d. h., ungefähr ebensoviel wie bei Einzelwagen, aber: der Betrieb mit elektrischen Zügen hat doch auch die nachgewiesenen Vorzüge und ist selbst auf minderwertigen Wegen unter allen Umständen gesichert, während die Einzelwagen oder die leichten Züge bei ungenügender Reibung der wenigen »Trieb«räder, z. B. auf durchweichten Straßen, versagen.

Die geringe Kolonnenlänge ist unter Umständen auch sehr viel wert; z. B. würde sie in den Kolonien die Bewachung und den Schutz der Kolonne gegenüber räuberischer Bevölkerung sehr erleichtern. Ebenso ist der geringe Personalbedarf sicher von großer Bedeutung; bei der Schwierigkeit der Heranziehung der vielseitigen Lebensbedürfnisse für Europäer ist dort eine geringe Kopfstärke des weißen Personals wohl meist erwünscht.

Die elektrischen Züge bieten ferner den Vorteil, daß ihre Kraftanlage leicht für den Antrieb von Maschinen und insbesondere für Beleuchtungszwecke verwertet werden kann. Das ist gerade auch in den Kolonien von Wert, indem es wiederum die Bewachung der Kolonne, bei Nacht, ermöglicht, falls sie auf freier Straße parkieren muß. Aber auch sonst kann, wenn der Zug nicht zum Fahren in Anspruch genommen wird, die Ausnutzung des in ihm vorhandenen fahrbaren Elektrizitätswerks häufig Nutzen bringen; mannigfache Verwertung wird sich z. B. in landwirtschaftlichen Betrieben ergeben.

Ein weiterer Vorteil des elektrischen Zuges ist der, daß die einzelnen »Anhänger« ohne Hilfe von Menschenkraft oder Zugtieren leicht, mittels eines 100 m langen Kabels, an beliebige Auf- oder Abladeplätze rangiert werden können. Der Maschinenwagen bleibt dabei stehen, der einzelne Anhänger läuft allein in den betreffenden Fabrik- oder Farmhof und dergleichen; er braucht nur durch einen Mann gelenkt zu werden.

Es muß nach alledem dabei bleiben, daß für große Transportaufgaben die gedrängte Kolonne aus wenigen elektrischen Zügen sehr viel zweckmäßiger ist als die viele Kilometer lange Kolonne von Einzelwagen. Das Mittelding zwischen beiden, die Kolonne aus »leichten Zügen«, ist wohl am vielseitigsten verwendbar und auch am billigsten in der Anschaffung, verliert aber auf schlechten Straßen wegen mangelnder Zugkraft sehr an Leistung, während der elektrische Zug auch hier durchaus leistungsfähig bleibt. Weiteres siehe später unter Nutzlast.

C. Kurvenwiderstand.

1. Züge.

Unter den besprochenen Systemen befanden sich zwei Arten von wirklichen Lastzügen, die Dampfzüge und der elektrische Zug. Für derartige, aus mehreren Fahrzeugen zusammengesetzte Systeme bedarf es ganz besonders der Prüfung, inwieweit beim Durchfahren von Kurven eine Erhöhung der Bewegungswiderstände eintritt.

a. Züge vom Schleppsystem (Dampfzüge).

Sehen wir uns zunächst den von einer Dampflokomotive gezogenen Zug an, so erkennen wir ohne weiteres, daß die von der Lokomotive ausgeübte Zugkraft beim Kurvenfahren nicht mehr in der Längsachse der Anhängewagen angreift, sondern unter einem größeren oder kleineren Winkel. Bei diesem schiefen Ziehen, dem die Räder der Anhängewagen natürlich zu folgen suchen, treten zu den bekannten Bewegungswiderständen dieser Räder neue hinzu, da die Räder sich nun nicht mehr einfach in ihrer Spur abrollen, sondern seitlich aus ihr herausgedrängt werden, nach der inneren Seite der Kurve hin, wobei offenbar gleitende Reibung zwischen Rad und Fahrbahn entsteht, die bremsend wirken muß (s. o. »Reibung«). Welche Erschwernis das für die ziehende Lokomotive bedeutet, werden wir uns durch eine Rechnung klar zu machen suchen. Vorerst sei daran erinnert, daß die Bewegungswiderstände ja ohnehin sehr mit der Zahl der Anhänger wachsen müssen. Wenn alle vier Räder der Lokomotive »angetrieben« sind und die Lokomotive nur einen Anhänger mit vier nicht angetriebenen Rädern zu ziehen hat, so ist das Verhältnis der Zahl der angetriebenen Räder zur Gesamtzahl der Räder = 4 : 8 oder 1 : 2. Das entspricht dem gebräuchlichen Verhältnis bei gewöhnlichen Automobilen, bei denen meist die beiden Hinterräder angetrieben sind, d. h. 2 : 4 oder 1 : 2. Sind bei der Lokomotive nur die Hinterräder angetrieben, so ist das Verhältnis schon viel schlechter, nämlich 2 : 8 = 1 : 4; auf ein Rad, das angetrieben ist und somit zur Fortbewegung beiträgt, kommen also schon vier Räder, deren Bewegungswiderstände zu überwinden sind, nämlich die Bewegungswiderstände des angetriebenen Rades selbst und noch diejenigen dreier anderer Räder. Werden zwei Anhängewagen geschleppt, so wird das Verhältnis = 2 : 12 oder 1 : 6; es ist klar, daß dabei dem angetriebenen Rad eine wesentlich größere Arbeit zugemutet wird.

Wie erheblich diese Widerstände nun noch zunehmen, wenn ein auf dem reinen Schleppsystem beruhender Zug durch eine scharfe Kurve fahren muß, ergibt das nachstehende Beispiel.*) Dasselbe zeigt einen Zug aus drei Wagen (Bild 7). Es sei ermittelt, daß zur Fortbewegung des letzten Wagens (C) bei gerader Fahrt eine Kraft P'' nötig ist. Der Wagen soll aber unter dem Winkel α'' abgelenkt werden; dazu ist eine Kraft N'' erforderlich, die = $\frac{P''}{\cos \alpha''}$ ist, also größer als P'' ;

$$\left[\cos \alpha'' = \frac{P''}{N''}; N'' \cdot \cos \alpha'' = P''; N'' = \frac{P''}{\cos \alpha''} \right].$$

*) Atti, a. a. O.

Diese Zugkraft N'' wird übermittelt durch den Wagen B. Der Wagen B bedarf an sich zu seiner Bewegung nur einer Kraft P' ; nunmehr muß aber, wegen der Kraftübertragung auf den Wagen C, in seiner Längsachse eine Gesamtkraft $P' + N''$ wirken, die also gleich $P' + \frac{P''}{\cos \alpha''}$ ist.

Aber auch diese Kraft greift nicht in der Fahrrichtung des Wagens B an, sondern unter einer Ablenkung vom Winkelwert α' . Die dabei zu entwickelnde Kraft N' ist wiederum größer als die in Richtung des Wagens B nötige, nämlich gleich

$$\frac{P' + \frac{P''}{\cos \alpha''}}{\cos \alpha'} \quad \text{oder} = \frac{P'}{\cos \alpha'} + \frac{P''}{\cos \alpha' \cdot \cos \alpha''}.$$

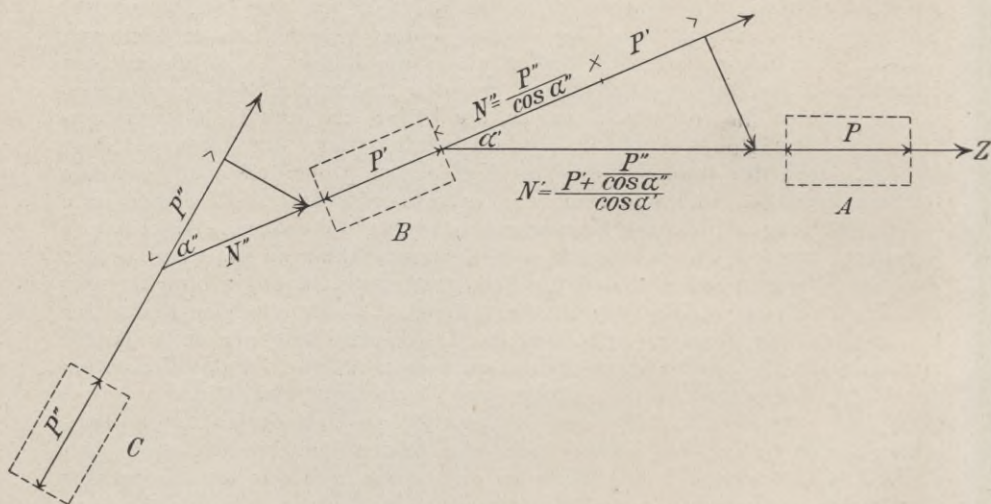


Bild 7.

In der Hauptfahrrichtung ist nun außerdem noch die für den Wagen A nötige Kraft P wirksam; es ergibt sich also die Gesamtzugkraft:

$$P + \frac{P'}{\cos \alpha} + \frac{P''}{\cos \alpha' \cdot \cos \alpha''}.$$

Wenn die Winkel nun alle untereinander gleich sind, was beim Durchfahren eines Kreises der Fall ist, so erhält man für beliebige viele Anhängewagen die Zugkraft

$$P + \frac{P'}{\cos \alpha} + \frac{P''}{\cos^2 \alpha} + \frac{P'''}{\cos^3 \alpha} + \dots$$

Bekanntlich sind die \cos -Werte echte Brüche, deren Nenner mit wachsendem Winkel immer größer wird (bis $\cos 90^\circ = 0$ ist); da diese echten Brüche im Divisor stehen, so werden die Werte der einzelnen Summanden des obigen Ausdrucks mit zunehmendem Winkel stets größer; d. h. zum Ziehen eines Anhängers in der Kurve ist eine um so größere Kraft er-

forderlich, je größer der Ablenkungswinkel wird; dazu kommt aber, daß bei jedem weiteren Anhänger der Divisor immer höher potenziert wird, d. h. für die hinteren Anhänger nimmt die erforderliche Zugkraft in enorm steigendem Maße zu. Stellt man sich z. B. vor, daß die Kurve der Straße eine vollkommene Kehrtwendung des Zuges bedingt, wie es bei Serpentinstraßen der Gebirgsstraßen (aber auch bei jedem Wenden) vorkommt, so erkennt man, daß die Zugkraft an dem letzten Wagen genau entgegengesetzt der Fahrtrichtung des ersten Wagens angreifen müßte. Bild 8 zeigt beispielsweise die Mittellinien von fünf miteinander verbundenen Wagen; der Zug macht eine volle Kehrtwendung, die vier Winkel der Ablenkung sind in dem dargestellten Moment offenbar untereinander gleich, und zwar $= 45^\circ$. Man kann annehmen, daß auch die Bewegungswiderstände der fünf Wagen die gleichen sind und daher ebenso die erforderlichen Zugkräfte; sie seien zu je 300 kg pro Wagen angesetzt. Dann ergibt sich folgende sehr einfache Errechnung der Gesamtzugkraft:

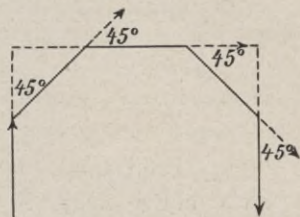


Bild 8.

$$Z = 300 + \frac{300}{\cos 45^\circ} + \frac{300}{\cos^2 45^\circ} + \frac{300}{\cos^3 45^\circ} + \frac{300}{\cos^4 45^\circ}.$$

Nun ist $\cos 45^\circ = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} = \frac{1}{2} \cdot 1,4 = 0,7$. Somit ist

$$Z = 300 + \frac{300}{0,7} + \frac{300}{0,7^2} + \frac{300}{0,7^3} + \frac{300}{0,7^4};$$

das ergibt

$$Z = 300 + 428,6 + 612,2 + 874,6 + 1249,5 = 3464,9.$$

Während also bei der Fahrt »geradeaus« sich lediglich die Widerstände der fünf Wagen (zu je 300 kg) addieren und eine Zugkraft von $5 \cdot 300 = 1500$ kg erforderlich wird, ergibt sich hier infolge der Kurve mehr als das Doppelte.

Diese Erwägungen dürften dargetan haben, welche erheblichen Schwierigkeiten der Betrieb mit Zügen, die nach dem reinen Schlepssystem gebaut sind, mit sich bringen muß, wenn kurvenreiche Straßen zu befahren sind.

b. Züge mit elektrischer Kraftübertragung.

Ganz anders verhält sich der Zug mit elektrischer Kraftübertragung. Hier wirkt auf die im Zuge laufenden Räder nicht die »Zugkraft« des vordersten Wagens. Dieser gibt nur den Strom ab für den Antrieb der Elektromotoren; jedes Rad im Zuge wird von einem eigenen Elektromotor angetrieben, ist also gleichsam ein Elektromobil für sich; es steht zwar in Verbindung mit dem Maschinenwagen, aber vor allem zum Zweck der Stromzuführung (mittels biegsamen Kabels); außerdem besteht noch eine Verbindung zum »Lenken«; sie ist so konstruiert, daß die hinteren Wagen genau der Spur des vorderen folgen, ohne aber im geringsten von ihm gezogen zu werden; die Kuppelungen zeigen keine Zugspannung. Jedes einzelne Rad erfährt nun allerdings auch hier beim Durchlaufen der Kurve eine gewisse Bremsung, es tritt ein etwas höherer

Widerstand auf; aber er potenziert sich nicht mit der Zahl der Anhänger, sondern bleibt für jedes Rad derselbe; diesen erhöhten Widerstand zu überwinden, ist Sache des einzelnen auf jedes Rad wirkenden Elektromotors; der Elektromotor aber kann vorübergehend erheblich überlastet werden, er überwindet diese kleinen, einzeln auftretenden Widerstände spielend, immer vorausgesetzt, daß die Primärmaschine, d. h. der Benzinmotor des Maschinenwagens, die nötige Kraft hergibt. Dafür kann aber leicht gesorgt werden, ohne daß das Gewicht des Maschinenwagens die zulässige Grenze irgend überschreiten müßte.

c. Vergleich beider Systeme.

Beim Schleppsystem kann die zur Überwindung des Kurvenwiderstandes nötige Zugkraft nur dadurch erreicht werden, daß die ziehende Lokomotive ein entsprechend höheres Reibungsgewicht erhält, was aber mit Rücksicht auf die Straßen nicht zulässig sein würde; es ist also wohl einleuchtend, daß es für den Schleppzug bei so erheblichen Bewegungen-

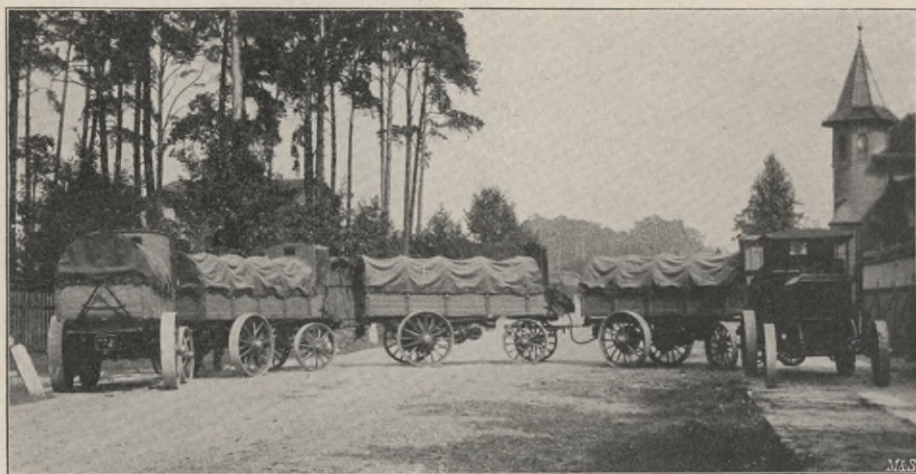


Bild 9. Der in Bild 6 dargestellte Zug, auf der Straße wendend.

widerständen, wie wir sie durch diese Untersuchung ermittelt haben, sehr bald eine Grenze der Leistungsfähigkeit geben muß; bei dem gebotenen mäßigen Gewicht vermag er nicht einen längeren angehängten Zug durch scharfe Kurven zu schleppen.

Der elektrische Zug löst diese Aufgabe ohne jede Schwierigkeit, da bei ihm das Reibungsgewicht des vorgespannten Maschinenwagens selbst für die Bewegung des angehängten Zuges keine Rolle spielt; er braucht nur so viel Reibungsgewicht, um sich selber bewegen zu können; die Anhängewagen vermag er in jeder Lage vorwärts zu bringen, wenn sie nur für sich selbst das nötige Reibungsgewicht haben, und das kann leicht erreicht werden, und wenn ferner die Leistung des Verbrennungsmotors auf dem Maschinenwagen ausreicht; letztere Bedingung erfüllt der moderne Verbrennungsmotor. Der elektrische Zug kann einen völligen Kreis ausfahren, so daß der Maschinenwagen den letzten Anhänger berührt.

Nimmt man bei der Kehrtwendung in Bild 8 die Länge des einzelnen Polygongliedes zu 6 m an (Länge des Wagens nebst Kuppelung), so erhält man einen Durchmesser der Kurve von etwa 14 m. Wie Bild 9 zeigt, ist ein elektrischer Zug imstande, auf der Straße eine volle Kehrtwendung zu machen, sofern die Straße eine normale Breite hat. Ob ein Zug mit vorgespannter Lokomotive bei ebenso viel Anhängern dazu imstande wäre (auch wenn die Lokomotive das für die Kurve erforderliche Reibungsgewicht besäße), darf bezweifelt werden; die Kurve muß sehr vorsichtig, also langsam gefahren werden; sehr leicht kann es nötig werden, den Zug in der Kurve selbst zum Halten zu bringen; das Wiederanfahren in der Kurve erfordert dann die Überwindung noch höherer Kurvenwiderstände. Das Ergebnis ist, daß der Schleppzug auf möglichst wenige Anhänger beschränkt werden muß, während beim elektrischen Zug die Zahl der Anhänger vom Kurvenwiderstand fast ganz unabhängig ist. In der Praxis gibt es natürlich eine Grenze für die Anhängerzahl; man wird beim elektrischen Zug nicht mehr als sechs oder sieben Anhänger anwenden; beim Schleppzug muß man sich aber in der Regel mit zwei Anhängern begnügen.

2. Die anderen Systeme.

Was das Kurvennehmen seitens der Einzellastwagen betrifft, so werden hier die Bewegungswiderstände nicht so groß, daß sie nicht von der Maschine überwunden werden könnten. Besondere Schwierigkeiten treten nicht auf. Dieser Gesichtspunkt kann daher bei der Beurteilung ihrer Leistungsfähigkeit außer Betracht bleiben.

Die leichten Züge, bei denen der Maschinenwagen ja den Anhänger als »Lokomotive« zieht, weisen natürlich die Nachteile des Schleppsystems auf. Sie bleiben aber in mäßigen Grenzen, weil grundsätzlich, bis auf seltene Ausnahmen, nur ein Anhänger angewendet wird. Unser Rechenbeispiel zeigt, daß hierbei der Kurvenwiderstand noch nicht sehr groß wird.

D. Nutzlast.

1. Allgemeines.

Die Untersuchung der Leistung der einzelnen Systeme muß ferner die geförderte Nutzlast berücksichtigen. Man pflegt das Gewicht des Fahrzeugs einschließlich der Vorräte an Betriebsstoff, in Vergleich zu stellen mit der beförderten Nutzlast und bewertet dasjenige System in dieser Hinsicht am günstigsten, bei dem die Nutzlast den relativ größten Teil des Gesamtgewichts ausmacht. Der verbleibende Rest setzt sich zusammen aus dem Eigengewicht und der »toten Last«. Es muß also als ein wesentlicher Vorteil angesehen werden, wenn sowohl das Eigengewicht als auch die tote Last so niedrig wie möglich gehalten wird. Demnach werden wir uns, auch ohne eingehende Prüfung, sogleich sagen müssen, daß fast alle Dampfwagen bisher gebräuchlicher Systeme in dieser Hinsicht vom Ideal weit entfernt sind, weil sie, wie wir früher gesehen haben, größtenteils im Vergleich zu den Wagen mit Verbrennungsmotoren ein mehr oder weniger hohes Eigengewicht haben müssen; sie sind ferner deshalb im Nachteil, weil sie, wie wir wissen, infolge der schlechten Wärmeausnutzung ihrer Brennstoffe diese in sehr viel größerer Menge, auf Kosten der Nutzlast, mitführen müssen als die Kraftwagen mit Verbrennungsmotoren, also viel tote Last befördern. Eine gute leistungs-

fähige Dampfstraßenlokomotive wiegt z. B., betriebsfertig, mindestens 9 t. Auf dieser Maschine selbst kann keine »Nutzlast« verladen werden; sie kommt ausschließlich auf die »Anhänger«. Vorzüglich konstruierte Anhängerwagen von Fowler wiegen bei 4 t Tragfähigkeit 2,5 t, bei 6 t Tragfähigkeit 3 t, bei 8 t Tragfähigkeit 3,5 t. Versuche haben gezeigt, daß auf bergigen Straßen die Lokomotive nur einen Anhänger ziehen konnte; sie förderte dann also z. B. bei Anwendung des leichtesten Anhängers nur 4 t mit Aufwendung eines Eigengewichts (Lokomotive + Wagen) von $9 + 2,5 = 11,5$ t, d. h. bei einem Verhältnis der Nutzlast zum Eigengewicht usw. von $4 : 11,5$ oder Nutzlast : Gesamtgewicht = $4 : 15,5$, d. h. beinahe $1 : 4$, genauer 0,258. Günstiger wird dies natürlich, wenn die Lokomotive so schwer ist, daß sie imstande ist, den schwersten Anhänger zu ziehen; die Nutzlast ist dann 8 t, das Eigengewicht aber etwa $12 + 3,5$ t, also Nutzlast zu Gesamtgewicht = $8 : 23,5 = 0,340$. Aber wir wissen, daß dies günstigere Resultat keine praktische Bedeutung hat, weil so große Gewichte überhaupt nicht auf den Straßen zugelassen werden.

Ein guter Lastkraftwagen mit Verbrennungsmotor, der die zulässige Grenze des Gesamtgewichts von 9 t einhält, hat, wie wir gesehen haben, etwa 3,5 bis 4 t Eigengewicht und trägt 5 t Nutzlast; das Verhältnis der Nutzlast zum Gesamtgewicht ist also $5 : 8,5$ bis $5 : 9$ oder 0,587 bis 0,555. Hierbei sind die toten Gewichte der mitgeführten Betriebsstoffe mit berücksichtigt.

Beschränkt man bei Dampfswagen oder Lokomotiven für Straßen die mitgeführte Brennstoffmenge, um desto mehr Nutzlast aufladen zu können, so verringert man dadurch unter Umständen den Aktionsradius so sehr, daß man schon nach wenigen Kilometern Fahrt Wassermangel hat und Umwege und Zeitverluste in den Kauf nehmen muß, um sich mit dem dringend nötigen Wasser versorgen zu können. Mit den Kohlen kommt man etwas länger aus, noch länger mit flüssigen Brennstoffen. Aber der außerordentlich große Aktionsradius, den die Verbrennungsmotoren haben, ist bei den bisherigen Dampfmaschinen nicht zu erreichen.

Schon dieser ganz allgemeine Vergleich zeigt also, welche großen Vorzüge der Verbrennungsmotor für den mechanischen Betrieb von Fahrzeugen besitzt, und daß diesen gegenüber die früher gerühmten Vorteile des Dampfmotors für unsere Zwecke zurücktreten müssen.

2. Nutzlastkoeffizient.

Durch eine einfache Rechnung*) läßt sich zur Darstellung bringen, welche Werte des Nutzlastkoeffizienten überhaupt bei einem Betrieb mit Kraftfahrzeugen erwartet werden können.

a. Lokomotivzüge.

Untersuchen wir diese Verhältnisse zunächst bei derjenigen Konstruktion, die vermutlich nach unseren allgemeinen Betrachtungen das schlechteste Resultat in dieser Hinsicht liefern wird, bei der Straßenlokomotive. Nehmen wir hierbei zu ihren Gunsten an, daß alle vier Räder angetrieben sind, also für die Zugleistung ausgenutzt werden können; letzteres ist z. B. bei der sogenannten Freibahnlokomotive der Fall, während die bekannten Fowlerschen Straßenlokomotiven nur zwei

*) Atti, a. a. O. Seite 261 ff.

angetriebene Räder haben; es muß aber dabei zugleich bemerkt werden, daß dieser »Vierräderantrieb« bei Lokomotiven eine noch keineswegs ausgereifte Konstruktion darstellt.

Das Gewicht einer solchen Lokomotive wollen wir »P« nennen, das des angehängten Zuges »Q« und, nach Douhet, ebenfalls sehr günstig*) annehmen, daß $\frac{3}{4}$ dieses Wertes Q in Nutzlast bestehe oder die Nutzlast zur Gesamtlast Q sich verhalte wie $\frac{3}{4} : 1$ oder wie $3 : 4$. Der Neigungswinkel der Straße sei α , der Koeffizient der Bewegungswiderstände sei f, der Reibungskoeffizient μ . Wie wir wissen, muß dann sein: der gesamte nutzbare Wert der Reibung $\mu \cdot P$ gleich oder größer als die Summe der Bewegungswiderstände, die sich zusammensetzen aus $(P + Q) \cdot f$, dem Bewegungswiderstand der Straße an sich, und $(P + Q) \cdot \operatorname{tg} \alpha$, dem durch die Steigung verursachten Bewegungswiderstand; also:

$$\mu \cdot P = (P + Q) \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha).$$

Das ergibt:

$$\mu \cdot P = P \cdot f + Q \cdot f + P \cdot \operatorname{tg} \alpha + Q \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$P \cdot (\mu - f - \operatorname{tg} \alpha) = Q \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$$

$$P = Q \cdot \frac{f + \operatorname{tg} \alpha}{\mu - f - \operatorname{tg} \alpha}.$$

Der »Nutzlastkoeffizient« n ist nun das Verhältnis der Nutzlast N zu dem Gesamtgewicht, also: $n = \frac{N}{P + Q}$ oder, wenn man die obigen Werte einsetzt,

$$n = \frac{\frac{3}{4} Q}{Q + Q \frac{f + \operatorname{tg} \alpha}{\mu - f - \operatorname{tg} \alpha}}.$$

Daraus erhält man**)

$$n = 0,75 \cdot \left(1 - \frac{f + \operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right).$$

Nun hat bekanntlich μ unter normalen Verhältnissen auf trockener Straße etwa den Wert 0,45; bei schlechtem Wetter kann man immer noch 0,2 rechnen; nur bei Eis und Schnee geht der Koeffizient noch wesent-

*) Beispielsweise hatte eine bekannte Konstruktion folgende Gewichte: (Lokomotive auf einer Achse 8 t, auf der anderen 6 t, zusammen $P = 14$ t); vier Anhängerachsen zu je 5,6 t, wovon 3,5 t Nutzlast waren; also ergab sich ein Verhältnis von 3,5 : 5,6 oder 5 : 8 (= 0,62), d. h. weniger als 3 : 4 (0,75). Bei einer anderen Ausführung ergab sich: (Lokomotive 6 + 5 = 11 t (P)); sechs Anhängerachsen zu 5 t, wovon 2,5 t Nutzlast waren, also das Verhältnis von Nutzlast zu Gesamtlast $Q = 1 : 2$, d. h., 0,5, also noch ungünstiger als 0,62. Das von Douhet angenommene Verhältnis 3 : 4 (oder 0,75) ist somit in der Praxis nicht erreicht worden.

**)

$$n = 0,75 \frac{Q}{\frac{Q(\mu - f - \operatorname{tg} \alpha) + Q(f + \operatorname{tg} \alpha)}{\mu - f - \operatorname{tg} \alpha}} = 0,75 \frac{Q(\mu - f - \operatorname{tg} \alpha)}{Q\mu - Qf - Q\operatorname{tg} \alpha + Qf + Q\operatorname{tg} \alpha}$$

$$= 0,75 \frac{Q \cdot (\mu - f - \operatorname{tg} \alpha)}{Q \cdot \mu} = 0,75 \cdot \left(\frac{\mu}{\mu} - \frac{f + \operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right).$$

lich weiter herab. Die Werte von »f« halten sich je nach dem Zustand der Straße, im allgemeinen zwischen 0,01 und 0,03. Abgesehen vom Winterbetrieb wird also der Bruch $\frac{f}{\mu}$ immer ein echter bleiben.

Beispielsweise sei $f = 0,02$ (Mittelwert) und $\mu = 0,2$; Steigung sei nicht vorhanden, $\text{tg } \alpha$ fällt also fort. Dann ist

$$n = 0,75 \cdot \left(1 - \frac{0,02}{0,2}\right) = 0,75 \cdot (1 - 0,1) = 0,75 \cdot 0,9 = 0,675 = \frac{675}{1000}$$

d. h. auf 1000 kg Gewicht des gesamten Zuges ($P + Q$) kommen 675 kg Nutzlast (N), was sehr günstig wäre*) und in der Praxis bei reinem Schlepssystem nicht erreicht wird, wohl aber beim »leichten Zug«.

Kommt nun aber »Steigung« hinzu, so nimmt die Nutzlast, die die Lokomotive befördern kann, sehr schnell ab. Eine Steigung von 10 pCt. oder 1 : 10 ergibt z. B. $\text{tg } \alpha = 10 : 100$ oder 0,10. Dann ist, bei mittlerem f , der Wert $(f + \text{tg } \alpha) = 0,02 + 0,10 = 0,12$; da $\frac{0,12}{\mu}$

$$\text{nun} = \frac{0,12}{0,2} = 0,6 \text{ ist, so wird hier } n = 0,75 \cdot (1 - 0,6) = 0,75 \cdot 0,4^{**})$$

= 0,3; die Nutzlast (N) beträgt also jetzt nur noch $\frac{3}{10}$ vom Gesamtgewicht ($P + Q$), und auf 1000 kg des letzteren kommen nur 300 kg Nutzgewicht. Nehmen wir eine Steigung von 1 : 6 oder 17 pCt., so

$$\text{haben wir } \text{tg } \alpha = \frac{17}{100} \text{ oder } 0,17; \text{ dann ist } (f + \text{tg } \alpha) = 0,02 + 0,17 = 0,19, \text{ und } \frac{0,19}{\mu} = \frac{0,19}{0,2} = 0,95; \text{ also}$$

$$n = 0,75 (1 - 0,95) = 0,75 \cdot 0,05 = 0,0375 \text{ (rd. } 0,04),$$

d. h. jetzt schrumpft die ganze Nutzlast, die noch von der Lokomotive gefördert werden kann, auf etwa $\frac{4}{100}$ oder $\frac{1}{25}$ des Gesamtgewichts zusammen, ist also nicht mehr der Rede wert. Man erkennt leicht, daß

*) Legt man die in der früheren Fußnote angegebenen Gewichte zugrunde, die sich auf einen Zug beziehen, der in der Ebene 15 t Nutzlast schleppt, so erhält man folgendes Bild: das Gesamtgewicht ($P + Q$) ist = $8 + 6$ t für P und $4 \cdot 5,6$ t für Q , zusammen 36,4 t gegen 15 t Nutzlast. Also wird $n = 15 : 36,4 = 0,412$. Die oben erwähnte andere Ausführung ergibt: $P = 6 + 5 = 11$ t, $Q = 6 \cdot 5 = 30$ t, $P + Q = 41$ t; die Nutzlast ist $6 \cdot 2,5 = 15$ t; somit $n = 15 : 41 = 0,366$, also ein noch schlechteres Verhältnis. Setzen wir statt des der Praxis widersprechenden zu günstigen Wertes 0,75 die S. 47 ermittelten Verhältniszahlen 0,62 oder 0,5, so ergibt sich statt $0,75 \cdot 0,9$ im ersteren Falle $0,62 \cdot 0,9 = 0,558$ (d. h. auf 1000 kg Gesamtgewicht 558 kg Nutzlast), im zweiten Falle $0,5 \cdot 0,9 = 0,450$ (d. h. auf 1000 kg Gesamtgewicht 450 kg Nutzlast). Die den Tatsachen in vorstehendem Beispiel entsprechenden Werte 0,412 oder 0,366 sind aber noch geringer; das ist auf das hohe Lokomotivgewicht P zurückzuführen, das in dem Ausdruck

$$\frac{N}{P + Q} \text{ den Nenner stark beeinflusst.}$$

**) Die oben erwähnten Konstruktionen, bei denen statt 0,75 ein tatsächliches Verhältnis von 0,412 oder 0,366 ermittelt ist, würden auf der gedachten Steigung ergeben: $0,412 \cdot 0,4$ oder $0,366 \cdot 0,4 = 0,165$ oder 0,146. Auf 1000 kg Gesamtgewicht kämen also nur noch 165 oder 146 kg Nutzlast (immer vorausgesetzt, daß $\mu = 0,2$, d. h. die Straße durch schlechtes Wetter schmierig geworden ist).

bei 18 pCt. Steigung der Wert $(f + \operatorname{tg} \alpha) = 0,02 + 0,18 = 0,2$ und somit $n = 0,75 \cdot \left(1 - \frac{0,2}{0,2}\right)$, d. h. = 0 wird.

Auf einer Steigung von 18 pCt. kann also selbst eine an allen vier Rädern angetriebene Straßenlokomotive bei ungünstigem Wetter nur noch sich selbst und die leeren Anhänger schleppen, aber keine Nutzlast mehr.

Allerdings ist mit einer Steigung von 18 pCt. nur sehr selten zu rechnen. In der Praxis kommen Steigungen über 1 : 8, d. h. rund 12 pCt., kaum vor. Das Beispiel soll aber die immerhin mögliche Grenze feststellen, bei der die Nutzlast = 0 wird.

Die geringe Leistung der Straßenlokomotive auf größeren Steigungen ist, wie schon erwähnt, auch durch Versuche festgestellt worden. Die Lokomotiven besitzen zwar Einrichtungen, um auch große Steigungen im Notfall überwinden zu können; mittels einer »Seilwinde« können sie einerseits sich selbst an schwierigen Stellen hinaufwinden, andererseits, indem sie stehen bleiben und die Räder unverrückbar feststellen, den oder die Anhängewagen, die sie im Schleppbetriebe nicht mehr vorwärts zu bringen vermochten, bis zu ihrem Standpunkt heraufwinden. Tritt aber die Notwendigkeit, von der Seilwinde Gebrauch zu machen, öfter ein, so bleibt natürlich infolge der vielen Aufenthalte für das eigentliche »Fahren« wenig Zeit, und die gesamte am Tage zurückgelegte Strecke wird sehr kurz. Die Tagesleistung ermäßigt sich infolgedessen so sehr, daß ein derartiger mechanischer Betrieb keinen Vorteil mehr bietet. Handelt es sich um Massentransporte, wozu eine ganze Reihe solcher Lokomotivzüge zu einer Kolonne zu vereinigen sein würde, so leuchtet wohl ohne weiteres ein, daß auf gebirgigen Straßen ein regulärer Betrieb mit derartigen Kolonnen unmöglich ist; jede einzelne Lokomotive müßte an den schwierigen Stellen erst sich selbst und dann ihre Anhänger heraufziehen. Dabei schrumpft die Gesamtleistung der Kolonne doch zu sehr zusammen.

b. Lastkraftwagen und »leichte Züge«.

Ein Lastkraftwagen wiegt (s. o.) marschfertig etwa 3500 kg und trägt mindestens 4000 kg Nutzlast. Nach Aufhebung der entgegengesetzten wegepolizeilichen Bestimmungen wird mit Sicherheit auf eine Nutzlast von 5000 kg gerechnet werden können bei höchstens 4000 kg Eigengewicht. Das Gesamtgewicht ist also jetzt normal 7500 kg, später 9000 kg. Dabei ist »n« = $\frac{N}{P + Q}$, wie wir sahen, unveränderlich =

$\frac{4}{7,5} = 0,533$ oder $\frac{5}{8,5} = 0,587$ oder $\frac{5}{9} = 0,555$, also günstiger

als bei den erwähnten Lokomotivzügen. Dies günstige Verhältnis wird hier, in normalen Fällen, durch die Straßensteigungen nicht verschlechtert. Bleiben wir bei der Beladung mit nur 4000 kg Nutzlast, so werden von den 7500 kg Gesamtgewicht etwa 5000 kg auf die hintere sogenannte Treibachse entfallen. Es muß dann sein: $\mu \cdot 5000$ gleich oder größer als $7500 \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$; ist $\mu = 0,2$, so haben wir auf ebener Straße bei mittlerem f ($= 0,02$) den Ausdruck $0,2 \cdot 5000 > 7500 \cdot 0,02$ oder $1000 > 150$; das Vorwärtskommen bietet also keinerlei Schwierigkeit. Nehmen wir eine Steigung von 1 : 10 oder 10 pCt. an, also $\operatorname{tg} \alpha = 0,10$, so muß sein: $0,2 \cdot 5000 > 7500 \cdot (0,02 + 0,10)$ oder $1000 > 900$; auch hier kommt also der Wagen noch glatt vorwärts. Bei

12 pCt. Steigung, der oben angegebenen normalen Grenze, hört dies auf, denn $7500 \cdot (0,02 + 0,12)$ ist $= 7500 \cdot 0,14 = 1050$, also > 1000 . Hier zeigt sich, daß unser Lastwagen bei so schlechtem Wetter ($\mu = 0,2$) auf der Straße nicht mehr Reibung genug findet. Würde nun in dieser Lage eine Erleichterung der Nutzlast etwas helfen? (Dies war, wie wir sahen, bei der Lokomotive der Fall.) Nein! Denn dadurch würde der Wert $\mu \cdot 5000$ herabgehen auf beispielsweise $\mu \cdot 4000 = 0,2 \cdot 4000 = 800$, während wir bisher mit 1000 rechnen konnten. Der Ausdruck $Q \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$ wird dabei gleich $6500 \cdot 0,14 = 910$, also zu groß für den Reibungswert 800. Es würde durch Abladen von Nutzlast schon bei geringerer Steigung der Fall eintreten, daß » $\mu \times$ Treibachsgewicht« nicht mehr größer ist als »Gesamtgewicht $\times (f + \operatorname{tg} \alpha)$ «. Nehmen wir aber nur eine etwas weniger schwierige Straße an, etwa mit $\mu = 0,3$, so wird die Kraft, mit der sich der Wagen auf die Straße stützen kann, schon $= 0,3 \cdot 5000 = 1500$, ist also dem Ausdruck $7500 \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$ überlegen, solange der Wert der Klammer nicht größer als 0,2 wird; wenn $f = 0,02$ bleibt, kann somit $\operatorname{tg} \alpha$ bis 0,18 anwachsen, d. h.: bis 18 pCt. Steigung zieht der Wagen mit voller Last die Steigung herauf, wenn nur $\mu = 0,3$ ist. Ist die Straße trocken ($\mu = 0,45$), so wird $\mu \cdot 5000 = 0,45 \cdot 5000 = 2250$ und ist hiermit wohl allen Werten von $7500 \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha)$ gewachsen; z. B. würde bei einer Steigung von 1 : 5 oder 20 pCt., die wohl nur in ganz seltenen Fällen auf der Straße vorkommen kann, etwa in einem Gebirgsdorf pp, $\operatorname{tg} \alpha = 20 : 100 = 0,2$; nimmt man » f « selbst zu 0,05 an (sehr schlechte Straße, aber trocken), so ist $(f + \operatorname{tg} \alpha) = 0,25$ und $7500 \cdot 0,25 = 1875$, also immer noch kleiner als 2250.

Greifen wir nochmals auf den obigen Fall zurück, in dem bei 12 pCt. Steigung und $\mu = 0,2$ sich ergab $\mu \cdot$ Treibachsgewicht $= \mu \cdot 5000 = 1000$ und $7500 \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha) = 7500 \cdot (0,02 + 0,12) = 1050$; der Lastkraftwagen konnte hier bei schlechtem Wetter ($\mu = 0,2$) nicht mehr vorwärts kommen. Wir haben gesehen, daß er bei günstigerem Wert von μ die Steigung nimmt. Beladen wir nun diesen Wagen statt mit 4000 kg Nutzlast mit 5000 kg, so wird die Treibachse rund 6000 kg schwer; dann ist $\mu \cdot$ Treibachsgewicht $= \mu \cdot 6000 = 0,2 \cdot 6000 = 1200$. Das Gesamtgewicht steigt auf 8500 kg; also ergibt sich $8500 \cdot (f + \operatorname{tg} \alpha) = 8500 \cdot (0,02 + 0,12) = 8500 \cdot 0,14 = 1190$. Der Wert $\mu \cdot$ Treibachsgewicht (1200) ist also überlegen, und die Fortbewegung des Wagens auf einer Steigung von 12 pCt. ist bei schlechtem Wetter ($\mu = 0,2$) dadurch ermöglicht worden, daß man dem Wagen noch 1000 kg Nutzlast mehr aufgepackt hat. Welcher Unterschied gegenüber den Verhältnissen beim Lokomotivbetrieb, wo mit wachsenden Schwierigkeiten der Fortbewegung die Nutzlast fortgesetzt ermäßigt werden muß!

Diese Überlegungen zeigen somit, daß hinsichtlich des günstigen Verhältnisses zwischen Eigengewicht und Nutzlast oder Nutzlast und Gesamtgewicht die mit Verbrennungsmotoren betriebenen Lastkraftfahrzeuge, die ihre Nutzlast selber tragen, den von Dampflokomotiven gezogenen Zügen sehr überlegen sind, sobald Steigungen zu befahren sind. Der gewöhnliche Lastkraftwagen mit Verbrennungsmotor trägt seine ganze Last auf sich, und erhält eben durch diese Last den hohen Reibungsdruck, den er zur Überwindung der Steigung braucht; gerade wenn er eine Steigung nehmen soll, so tut er das, bis zu einer gewissen Grenze, um so leichter, je stärker sein Reibungsdruck (also seine Nutzlast) ist, wenn nur die Motorkraft ausreicht, um ihn zur Überwindung der Steigung zu befähigen, und der Reibungskoeffizient nicht zu sehr herabsinkt.

Wenn nun ein solcher Lastkraftwagen mit Benzinmotor noch einen mit einigen Tausend Kilogramm Nutzlast beladenen Anhängewagen mitschleppt, so wird das Nutzlastverhältnis noch günstiger, solange der Kraftwagen den Anhänger tatsächlich zu ziehen vermag. Der Kraftwagen wird hierbei zur Lokomotive, die aber bereits auf sich selbst eine namhafte Nutzlast befördert. Wird ihm das Ziehen des Anhängers auf einer Steigung schwer, so kann ihm wiederum durch Vermehrung seines Reibungsgewichts geholfen werden, indem beispielsweise der Anhänger um 1000 kg Nutzlast erleichtert und der »Lokomotiv« wagen durch Aufladen dieser 1000 kg um so viel leistungsfähiger gemacht wird. Natürlich hat dies seine Grenzen. Die Ermittlung derselben ist nach den obigen Rechenbeispielen leicht auszuführen. Prüfen wir z. B., ob ein Lastkraftwagen, der vollbeladen 8000 kg wiegt und dessen Hinterachse 5000 kg Achsdruck hat, auf einer Steigung von 10 pCt. noch einen Anhänger mit 4000 kg Nutzlast oder etwa 6000 kg Gesamtgewicht ziehen kann. Ein für die Zugleistung nutzbarer Reibungswert wird nur an den Treibrädern erzielt, mit $\mu \cdot 5000$. Nehmen wir für μ zunächst einen nicht zu ungünstigen Wert an, etwa 0,3, so erhalten wir den nutzbaren Wert der Reibung oder die Reibungsstützkraft $= 0,3 \cdot 5000 = 1500$ kg. Die Bewegungswiderstände $Q \cdot (f + tg \alpha)$ sind $= (8000 + 6000) \cdot (0,02 + 0,10) = 14\,000 \cdot 0,12 = 1650$, also zu groß, um durch die Arbeit der Treibräder überwunden werden zu können. Erleichtern wir nun den Anhänger um 1000 kg und laden diese auf den Kraftwagen. Wird diese Last möglichst über die Hinterachse gebracht, so ergibt sich jetzt eine Reibungsstützkraft (nutzbarer Wert der Reibung) von $0,3 \cdot 6000 = 1800$; die Bewegungswiderstände werden nunmehr überwunden. (Dabei ändert sich $Q \cdot (f + tg \alpha)$ nicht; Q wird $9000 + 5000$, also wieder $= 14\,000$.) Natürlich müßte der Kraftwagen tragfähig genug sein.

Das Nutzlastverhältnis wird bei $5000 + 4000$ kg Nutzlast und $8000 + 6000$ kg Gesamtgewicht $= 9000 : 14\,000 = 0,643$, also das weitaus günstigste der bisher betrachteten Systeme, vorausgesetzt, daß der Anhänger stets mitgeschleppt werden kann.

Aber das ist leider nicht immer der Fall. Nehmen wir schlechtes Wetter an ($\mu = 0,2$), so kann der mit 4000 kg beladene Anhänger auf der Steigung von 10 pCt. nicht mehr geschleppt werden. Den Bewegungswiderständen (1650) steht dann nur ein Reibungswert von $0,2 \cdot 6000 = 1200$ gegenüber. Selbst wenn wir noch weitere 1000 kg vom Anhänger auf den vorgespannten Kraftwagen (über der Hinterachse) überladen, so daß diese Achse ein Gewicht von 7000 kg erhält, reicht es nicht aus, denn der Reibungswert wird dadurch nur $= 0,2 \cdot 7000 = 1400$. Sobald der Wagen zur »Lokomotive« wird, unterliegt er eben den für diese Art von Maschinen gültigen Gesetzen.

Die Prüfung zeigt demnach, daß der außerordentliche wirtschaftliche Vorteil, der sich aus der Erhöhung der Nutzlast durch die Mitführung eines Anhängers ergibt, nur da voll ausgenutzt werden kann, wo keine bedeutenden Steigungen mit der Last zu befahren sind. Steigungen von 10 pCt. sind aber bei Kunststraßen selbst im Gebirge nicht häufig; auf gut gebauten Straßen und bei trockenem Wetter wird daher der Betrieb des Lastkraftwagens mit einem Anhänger unter normalen Verhältnissen wohl immer durchführbar sein. Allerdings trifft dies auch für Lokomotiven zu; es darf aber nicht vergessen werden, daß die Lokomotive, da sie nicht selbst Nutzlast trägt, bei 10 pCt. Steigung schon sehr an Nutzlast einbüßt, und daß von einer gewissen Grenze an ihre Nutzlast $= 0$

wird; dagegen fördert der Lastwagen mit Verbrennungsmotor, auch für den Fall, daß er seinen Anhängewagen nicht mehr mitschleppen kann, doch stets auf sich selber eine ganz ansehnliche Nutzlast.

c. Züge mit elektrischer Kraftübertragung.

Ein solcher Zug befördert, wie wir wissen, 30 t Nutzlast; er besteht beispielsweise aus einem Maschinenwagen und sechs Anhängern. Sowohl der Maschinenwagen, der keine Nutzlast trägt, wie auch die beladenen Anhänger wiegen je 7500 kg. Das Gesamtgewicht ist also $7 \cdot 7500 = 52\,500$ kg. Das Nutzverhältnis ergibt sich demnach zu $30 : 52,5$ oder $0,571$, kommt also etwa demjenigen des Einzellastwagens gleich; hinter demjenigen des »leichten Zuges« bleibt es freilich zurück, aber es darf nicht übersehen werden, daß der elektrische Zug jede vorkommende Straßensteigung spielend nimmt, während der leichte Zug doch unter Umständen den Anhänger zurücklassen muß, wodurch sein Nutzwert wieder auf den des elektrischen Zuges ermäßigt wird.

E. Allgemeiner Ausdruck für die Leistungsfähigkeit.

Nach diesen Betrachtungen über die Leistungsfähigkeit bedarf es noch eines kurzen Eingehens auf die allgemein gebräuchliche Form des Ausdrucks für die Leistungsfähigkeit durch den Maßbegriff »Nutztonnenkilometer«. Diese Zahl ist das Produkt aus der täglich zurückgelegten Kilometerzahl und der geförderten Nutzlast in Tonnen. Hiernach ergibt sich folgender übersichtlicher Vergleich der besprochenen Systeme.

Der Einzelwagen fördert 5 t täglich unter fast allen Wegeverhältnissen mindestens 100 km weit. Er leistet also täglich mindestens **500** Nutztonnenkilometer.

Der leichte Zug (Einzelwagen mit einem Anhänger) fördert unter nicht zu ungünstigen Verhältnissen 10 t auf dieselbe Entfernung, somit täglich **1000** Nutztonnenkilometer. Ein in neuerer Zeit erprobter Typ, der mit der Absicht gebaut ist, den Anhänger möglichst überall mitschleppen zu können, ladet auf dem Maschinenwagen nur 4500 kg und auf dem Anhänger nur 2000 kg, kommt aber mit dieser Last auf steilen Bergstraßen noch sehr gut vorwärts. Er vermag ein Tempo von etwa 150 km pro Tag durchzuhalten. Seine Leistung ist also $6,5 \text{ t} \cdot 150 = \mathbf{975}$ Nutztonnenkilometer.

Die Dampflokomotive kann durchschnittlich kaum mehr als 50 km täglich fahren. Sie fördert dabei im

Flachland 15 t (Leistung $15 \cdot 50 = \mathbf{750}$ Nutztonnenkilometer),

Hügelland 10 t (Leistung $10 \cdot 50 = \mathbf{500}$ Nutztonnenkilometer),

Gebirge 5 t (Leistung $5 \cdot 50 = \mathbf{250}$ Nutztonnenkilometer),

dies aber auch nur da, wo der Anhänger noch mitkommt; muß er abgehängt werden, so wird die Leistung = **0**. Eine Steigerung der Leistung der Lokomotive wäre nur möglich,

1. wenn sie so konstruiert würde, daß sie nicht lediglich Schleppmaschine ist, sondern zugleich selbst Last trägt; ein Vorteil wäre es, alle vier Räder anzutreiben, sofern sich hierfür eine einwandfreie Bauart findet, die auch wirtschaftlich arbeitet;

2. wenn der mehrachsige Anhängzug, dessen Achsen keinen eigenen Antrieb haben können, auf zwei oder drei Achsen von großer Tragfähigkeit und guter Ladefläche zusammengeschoben werden könnte, unter Einhaltung geringen Eigengewichts.

Der elektrische Zug kommt mit 30 t Nutzlast überall durch und nimmt dabei noch Steigungen von 10 pCt. im Tempo von 5 km pro Stunde. Wo solche Steigungen vorkommen, pflegen sie mit ähnlichen Gefällen abzuwechseln, der Verlust an Marschgeschwindigkeit bergauf gleicht sich also bergab wieder ziemlich aus. Wir müssen daher dem elektrischen Zuge, bei seiner Fähigkeit, schnell zu fahren, auf guten Straßen eine mittlere Marschgeschwindigkeit von 100 km täglich zugestehen. Seine Leistung ist demnach $30 \cdot 100 = 3000$ Nutztonnenkilometer.

F. Motorstärke.

Schon früher haben wir gesehen, daß die Zahl der Pferdestärken, die zur Überwindung der Bewegungswiderstände gebraucht werden und an den Treibrädern auftreten müssen, durch den Ausdruck $\frac{Z \cdot v}{75}$ gewonnen wird (Seite 15); was unter einer Pferdestärke zu verstehen ist, wurde Seite 24 erläutert.

1. Lastkraftwagen.

Ein Lastkraftwagen mit Verbrennungsmotor muß, wenn er das leisten soll, was in unseren Beispielen Seite 36 und 50/51 angenommen wurde, einen Motor von mindestens 30 PS. haben. Wie kommt es, daß eine so große Kraft erforderlich wird? Nehmen wir beispielsweise einen Lastkraftwagen an, der 8000 kg Gesamtgewicht hat (bei 5000 kg Nutzlast); er soll imstande sein, auf einer guten Straße von 10 pCt. Steigung bergauf mit Last »anzufahren« und ein Tempo von 5 km/Std. durchzuhalten.

Daß die zum Anfahren erforderliche Beschleunigungskraft nach der Formel $\frac{Q \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot l}$ zu berechnen ist, war schon Seite 13 dargetan. Bei

Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor sind, wie bekannt, in der Regel durch vier Zahnradpaare vier Geschwindigkeitsübersetzungen gegeben, durch welche, bei normaler Tourenzahl, vier normale Fahrtempos des Kraftwagens bestimmt sind. Zwischenabstufungen der Fahrgeschwindigkeit können zwar durch Beeinflussung der Zylinderfüllung, der Gasqualität und des Zündungszeitpunktes in gewissem Umfange erzielt werden, aber der Motor arbeitet dabei nicht mit der normalen Stärke; er wird entweder vorübergehend durch höhere Tourenzahl überanstrengt oder, und zwar meistens, durch Abdrosseln usw. verlangsamt.

Zum »Anfahren« wendet man natürlich diejenige Übersetzung an, die das geringste der vier möglichen Normaltempos bei voller Motorleistung bestimmt. Es sei nun angenommen, daß die vier Übersetzungen unseres Kraftwagens so bemessen sind, daß ihre Einschaltung dem Wagen die vier Normalgeschwindigkeiten 12, 8, 5, 2,5 km/Std. verleiht. Zum Anfahren wird also dasjenige Zahnradpaar eingeschaltet, welches die Fahrgeschwindigkeit 2,5 km/Std. oder 0,7 m/sec. ergibt; $v = 0,7$. Der Übergang von der Geschwindigkeit Null, Ruhezustand, zu der eingeschalteten Geschwindigkeit 0,7 vollzieht sich beim Kraftwagen ziemlich schnell,

besonders dann, wenn das Fahrzeug nicht sehr sorgfältig bedient wird; l sei etwa zu 2 m angenommen. Dann brauchen wir für das Anfahren allein eine Zugkraft von

$$\frac{8000 \cdot 0,7^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 2} = \text{rd.} \frac{8000 \cdot 0,5}{4 \cdot 10} = \frac{4000}{40} = 100 \text{ kg.}$$

Dazu kommt aber noch diejenige Zugkraft, die ohnehin zur Überwindung der Bewegungswiderstände der Straße erforderlich ist; sie ist nach der Formel $Q \cdot (f + \text{tg } \alpha)$ unter der Annahme guten Steinpflasters, Seite 10, etwa = $8000 (0,02 + 0,10) = 8000 \cdot 0,12 = 960$. Im ganzen ergibt sich also ein Bewegungswiderstand (und somit auch eine Zugkraft) von $960 + 100 = 1060$ kg.

Diese Zugkraft muß lediglich durch die beiden Triebäder des Kraftwagens ausgeübt werden; sie sind mit 5000 kg belastet; der Wert der zwischen Straße und Rädern erzeugten Reibung wird, wenn wir ungünstige Verhältnisse annehmen, (Seite 47/48) = $0,2 \cdot 5000 = 1000$, würde also zur Überwindung von 1060 kg Bewegungswiderstand einschließlich Anfahrwiderstand nicht ausreichen. Für das Fahren selbst reicht er dagegen aus ($1000 > 960$); um das Anfahren zu ermöglichen, hätten wir nur den Wert von μ ein wenig zu erhöhen, z. B. durch Beseitigen des Schlammes oder Sandstreuens; mit etwa $\mu = 0,25$ gelingt das Anfahren schon, denn wir erhalten dann $\mu \cdot N = 0,25 \cdot 5000 = 1250$, also > 1060 .

Da die zum Anfahren nötige Kraft leicht durch schlechtes Einkuppeln (mangelhafte Bedienung) von 100 auf 200 kg und noch mehr anwachsen kann, wollen wir verlangen, daß die Triebäder für das Anfahren rund 1500 kg Zugkraft entwickeln sollen; (daß sich dabei noch nicht die größte vorkommende Motorstärke ergibt, wird sich sogleich zeigen).

Nehmen wir nun an, daß der Wagen zunächst mit der Geschwindigkeit $v = 0,7$ weiterfährt, so brauchen wir an den Hinterrädern

$$\frac{Z \cdot v}{75} = \frac{1500 \cdot 0,7}{75} = 14 \text{ PS.}$$

Die Anwendung der zweiten Übersetzung (Tempo 5 km/Std.; $v = 1,4$ m/sec.) würde ergeben

$$\frac{Z \cdot v}{75} = \frac{1000 \cdot 1,4}{75} = 18,7 \text{ PS.}$$

(Z ist hier = 1000 gesetzt, weil ein »Anfahren« mit eingeschalteter zweiter Geschwindigkeit nicht vorkommen darf, also nur die Widerstände 960 = rund 1000 zu berücksichtigen sind.)

Beim 3. Gang (8 km/Std. oder 2,2 m/sec.) erhielte man $\frac{1000 \cdot 2,2}{75} = 29,3$ PS.;

beim 4. Gang (12 km/Std. oder 3,3 m/sec.) $\frac{1000 \cdot 3,3}{75} = 44$ PS. In diesen Tempos soll aber nach der Aufgabe die Steigung von 10 pCt. mit dem 8000 kg schweren Wagen nicht befahren werden; die hierfür nötigen sehr hohen Leistungen bleiben also außer Betracht.

Sollen an den Hinterrädern 18,7 PS. wirksam sein, so muß der Motor selbst erheblich stärker sein, denn von der Kraft des Motors

gehen auf dem Wege bis zu den Hinterrädern infolge der eigenartigen Übertragungsmechanismen ungefähr 35 pCt. verloren; die an den Rädern wirkenden 18,7 PS. sind also nur $\frac{65}{100}$ der eigentlichen Motorkraft, der Motor muß demnach $18,7 \cdot \frac{100}{65}$ oder 28,5 PS. haben. Bedenkt man nun, daß der Motor häufig nicht seine volle Leistung hergibt (infolge mangelhafter Schmierung, unrichtigen Gasgemisches usw.), so muß man den Motor noch um etwa 10 pCt. stärker wählen, also zu wenigstens 30 PS.

2. Dampfzug.

Bei Dampfmaschinen ist der mechanische Wirkungsgrad der Übertragung wegen der geringeren Anzahl der erforderlichen Übertragungsglieder günstiger, so daß die effektive Leistung für dieselbe Aufgabe nur etwa 25 PS. zu betragen brauchte. Die Aufgaben liegen aber außerdem hier etwas anders. Die Dampflokomotive soll Anhänger »ziehen«; nehmen wir zwei Anhänger an, so haben wir etwa folgende Achsdrücke: Lokomotive auf der Lenkachse 5000 kg, auf der Triebachse 6000 kg; dazu vier Anhängerachsen zu je 4000 kg; zusammen 27 000 kg. Die Bewegungswiderstände sind für einen solchen Zug

$$27\,000 (f + tg \alpha) = 27\,000 (0,02 + 0,10) = 3240;$$

zum »Anfahren« gehört hier nicht ein so großes Mehr an Zugkraft, weil die Dampfmaschine sehr allmählich anzieht. Die Fahrgeschwindigkeit eines solchen Dampfzuges ist gering, etwa 4 km/Std. Wir werden von ihm auf der Steigung von 10 pCt. nur etwa 2 km/Std. oder 0,5 m/sec. verlangen dürfen.

$$\frac{Z \cdot v}{75} \text{ wird dann} = \frac{3240 \cdot 0,5}{75} = \frac{1620}{75} = 21,6 \text{ PS.}$$

an den Triebrädern; da nun die Dampfmaschine nur einen Getriebeverlust von etwa 25 pCt. = $\frac{1}{4}$ hat, so erhalten wir eine tatsächliche Motorstärke von $\frac{21,6 \cdot 4}{3} = \text{rd. } 30 \text{ PS.}$ Die Lokomotive kommt also auch mit etwa 30 PS. aus, obwohl sie 27 000 kg Gesamtgewicht zu schleppen hat.

3. Elektrischer Zug.

Der elektrische Zug hat einen Maschinenwagen und sechs Anhänger gleich sieben Fahrzeuge = 28 Räder, die alle »angetrieben« sind. Jedes Rad ist gleichmäßig mit höchstens 2000 kg belastet, hat also einen Widerstand von $2000 \cdot (0,02 + 0,10) = 240 \text{ kg}$; auch hier ist das »Anfahren« so allmählich, daß die Beschleunigungskräfte keinen großen Einfluß haben. Indessen sei angenommen, daß an jedem Rade 250 kg Zugkraft wirksam sein müssen. Der elektrische Zug muß die Steigung von 10 pCt. ebenso schnell herauffahren wie der Lastkraftwagen mit Verbrennungsmotor, also mit 5 km/Std. = 1,4 m/sec.;

$$\frac{Z \cdot v}{75} = \frac{250 \cdot 1,4}{75} = \text{rd. } 4,6 \text{ PS.}$$

Für 28 Räder sind also 128 PS. erforderlich, oder an der Primärmaschine, Benzinmotor mit Dynamo, bei einem Getriebeverlust von 20 pCt. = $\frac{1}{5}$ eine Leistung von $\frac{128 \cdot 5}{4} = 160$ PS. Tatsächlich werden zwei Motoren von je 90 PS. verwendet, es ist also ein großer Kraftüberschuß als Reserve vorhanden (wegen der unsicheren Leistung des Benzinmotors). Diese beiden Motoren brauchen aber nur dann zusammenzuwirken, wenn so starke Steigungen (wie 10 pCt.) mit der verhältnismäßig großen Geschwindigkeit von 5 km/Std. zu befahren sind. Fällt die Steigung fort, so kann mit 10 km/Std. oder 2,77 m/sec. gefahren werden;

$$2000 \cdot (0,02 + 0) = 40 \text{ kg}; \quad \frac{Z \cdot v}{75} = \frac{40 \cdot 2,7}{75} = 1,5 \text{ PS. pro Rad};$$

$$28 \cdot 1,5 = 42; \quad \frac{42 \cdot 5}{4} = 52 \text{ PS.}$$

Es wird also hier nicht nur einer der beiden Motoren ausgeschaltet, sondern von dem anderen, der 90 PS. leisten kann, werden nur 52 PS. beansprucht.

IV. Wirtschaftlichkeit.

Bei einem Vergleich der verschiedenen Systeme darf die Frage der Wirtschaftlichkeit nicht außer Betracht bleiben. Unsere Erwägungen hierüber können sich im wesentlichen auf den »leichten Zug«, d. h. den normalen Lastkraftwagen mit einem Anhänger, beschränken, da die anderen Systeme für die Praxis zur Zeit geringere Bedeutung haben. Der leichte Lastkraftwagen hat nur als Lieferungswagen für große Geschäfte in den Städten eine gewisse Verbreitung erlangt, wo vielfach das Interesse der Wirtschaftlichkeit gegenüber demjenigen der Reklame zurücktritt; der elektrische Zug ist noch in der Entwicklung begriffen; die Dampfzüge haben sich nur ganz vereinzelt Freunde zu erwerben vermocht; alle diese Systeme werden daher nur kurz zu streifen sein. Der »leichte Zug« dagegen hat sich in mehrfachen Formen eingebürgert und beansprucht das allgemeinste Interesse.

Eine auf praktischen Erfahrungen beruhende Berechnung der Kosten eines Betriebes von 10 Wagen ergibt folgendes Bild:

Für den Betrieb selbst sind nur acht Wagen mit acht Anhängern bestimmt, zwei Wagen und zwei Anhänger dienen als Reserve. Jeder Zug fährt täglich 100 km (oder mehr) und befindet sich an 300 Tagen im Jahre im Betrieb. Jeder von den acht Zügen fährt also jährlich 30 000 km, alle acht Züge zusammen fahren 240 000 km.

I. Für die Beschaffung und Einrichtung sind aufzuwenden:

für 10 Lastkraftwagen mit Eisenreifen je	
16 000 M	160 000 M
für 10 Anhängewagen je 2000 M	20 000 »
	Betrag 180 000 M

Übertrag	180 000 M
für den Betrieb im Winter sind an den Hinterachsen der Kraftwagen Räder mit Gummireifen anzubringen; 20 solche Räder kosten	40 000 »
für Werkstatt, Unterbringungsräume, Benzin- depot usw.	20 000 »
Ausstattung mit Werkzeugen und Werk- zeugmaschinen usw.	10 000 »
Summa I:	<u>250 000 M.</u>

II. Für den Betrieb sind jährlich aufzuwenden:

Personal:

1 Meister und Materialverwalter	2 500 M
10 Wagenführer je 1500 M <i>fehlt nur 20 auf Hilfs 36</i>	15 000 »
2 Putzer je 1000 M	2 000 »

Verbrauch an Betriebsstoffen, unter der Annahme, daß 200 000 km mit Benzol, 40 000 km mit Benzin gefahren werden: Benzol 0,7 bis 0,8 kg pro 1 km = rd. 17 Pfennig/km, für 200 000 km	34 000 »
Benzin 0,5 kg pro 1 km = rd. 20 Pfennig/km, für 40 000 km	8 000 »
Schmiermaterial rd. 3 Pfg. pro 1 km, für 240 000 km	7 000 »
Unterhaltung der Fahrzeuge, zu 6 Pfennig pro 1 km angenommen	15 000 »
Tagesspesen der Wagenführer, zu 300 M jährlich anzusetzen	3 000 »

Erneuerungsrücklagen:

15 pCt. von den Kraftfahrzeugen	24 000 »
10 pCt. von den Anhängewagen	2 000 »
20 pCt. von den Gummirädern	8 000 »
5 pCt. von den Unterbringungsräumen usw.	1 000 »
15 pCt. von den Werkzeugen usw.	1 500 »
Versicherung der Fahrzeuge, je 300 M	3 000 »
Verzinsung der Anlagekosten (250 000 M) mit 4 pCt.	10 000 »
Summa II:	<u>136 000 M.</u>

Auf 240 000 km Fahrt sind also 136 000 M Kosten zu veranschlagen, d. h. pro 1 km im Sommer (bei Eisenreifen) 56 Pfennig, im Winter wegen der Benutzung der Gummiräder pro 1 km 12 Pfennig mehr, also 68 Pfennig; im Durchschnitt werden zu rechnen sein:

9 Sommermonate je 56 Pfennig = 504 Pfennig

3 Wintermonate je 68 » = 204 »

Summa 708 Pfennig

also im Mittel der 12 Monate $\frac{708}{12} = 59$ Pfennig/km.

Die Wagen fördern mit Anhänger durchweg 10 t Nutzlast, also kosten 10 t auf 1 km (= 10 tkm) 59 Pfennig oder 1 tkm = 6 Pfennig (höchstens!).

Vergleicht man damit den Pferdebetrieb, der nach zuverlässigen Angaben im allgemeinen zu 15 Pfennig/tkm anzunehmen ist, so erweist sich der Betrieb mit dem »leichten Zuge« bei 10 t Nutzlast als wesentlich vorteilhafter; das Fortlassen des Anhängewagens hat nur eine sehr mäßige Herabminderung der Kosten zur Folge, pro 1 tkm müssen sich also dann die Kosten fast verdoppeln, so daß die große Überlegenheit gegenüber dem Pferdebetrieb dann fast ganz verschwindet.

Führt man in ähnlicher Weise die Rechnung durch für den leichten Lastkraftwagen, für die Dampflokomotivzüge und für den elektrischen Zug, so erhält man folgende Zahlen:

Bei den »leichten« Lastkraftwagen (für 1000 bis 2000 kg Nutzlast) ergibt sich ein Preis von etwa 30 Pfennig für 1 km; es kostet somit, falls der Wagen nur 1000 kg trägt, 1 tkm 30 Pfennig, trägt der Wagen 2000 kg, so ermäßigt sich der Preis pro 1 tkm auf etwa die Hälfte = 15 Pfennig; hierbei ist indessen eine Leistung von fast 200 km täglich angenommen, die doch wohl nur selten ausgenutzt werden kann. Auf alle Fälle arbeitet ein solches Fahrzeug offenbar wesentlich weniger wirtschaftlich als ein Lastzug der vorigen Art.

Beim Betriebe mit Dampflokomotiven, deren tägliche Leistung nur zu etwa 50 km anzunehmen ist, würden sich die Kosten pro 1 km auf etwa 50 Pfennig stellen; da der Zug unter günstigen Umständen 10 t fördern kann, so kostet 1 tkm nur rund 5 Pfennig; wird aber weniger gefördert, so erhöht sich der Einheitssatz entsprechend.

Für den elektrischen Zug würden sich die Kosten pro 1 km, ungünstig gerechnet, auf etwa 160 Pfennig belaufen, bei einer täglichen Leistung von 100 km. Der Zug fördert aber auch bei jeder Fahrt 30 t; 1 tkm kostet demnach auch hier nur 5 bis 6 Pfennig.

V. Allgemeines Ergebnis.

Der Zweck unserer Untersuchungen ist im wesentlichen erreicht, wenn der aufmerksame Leser dadurch zu der Überzeugung gelangt sein sollte, daß

1. bei mechanisch betriebenen Fahrzeugen die Fortbewegung nur bei den »angetriebenen« Rädern unter allen Umständen gesichert ist, und zwar — in gewissen Grenzen — umso mehr, je schwerer sie belastet sind; daß also Züge mit mehreren nicht angetriebenen Achsen, d. h. ganz besonders Lokomotivzüge mit mehreren An-

- hängewagen, auf Straßen mit großen Bewegungswiderständen nicht leistungsfähig sein können; daß
2. die an sich erwünschte Steigerung der Belastung sehr schnell ihre Grenze findet wegen des jetzigen Zustandes unserer Straßen und Brücken, so daß Fahrzeuge von mehr als 9 t Gewicht, besonders also Lokomotiven, auf vielen Straßen überhaupt nicht in Betracht kommen; daß
 3. die zur Fortbewegung der angetriebenen Räder oder Achsen notwendige Belastung zu einem möglichst großen Teil in Nutzlast bestehen muß, somit alle Konstruktionen unzweckmäßig sind, die hohe Eigengewichte haben und tote Lasten erfordern, namentlich also die nach dem reinen Schlepssystem arbeitenden Straßenlokomotiven, die auf der Lokomotive selbst keine Nutzlast tragen können; daß
 4. aus den angegebenen Gründen von den zur Zeit vorhandenen Systemen — abgesehen von Spezialfällen — für einen überall möglichen und zulässigen, sicheren Betrieb nur in Frage kommen können: die Lastkraftwagen mit Verbrennungsmotoren, gegebenenfalls mit einem Anhänger, und der elektrische Zug; daß
 5. ein Lastkraftfahrzeugbetrieb um so wirtschaftlicher arbeitet, je größer er ist; daß also diejenigen Konstruktionen die meiste Förderung verdienen, die für Großbetriebe, d. h. für Massentransporte, am geeignetsten sind; daß
 6. die Beförderung großer Transportmengen um so leichter zu bewältigen ist, je größer die Transporteinheit gewählt wird, d. h. also, daß unter diesem Gesichtspunkt in erster Reihe von Wert ist: der elektrische Zug, demnächst der Lastkraftwagen mit einem Anhänger und drittens der Lastkraftwagen ohne Anhänger.





Gedruckt in der Königlichen Hofbuchdruckerei von E. S. Mittler & Sohn,
Berlin SW68, Kochstraße 68—71.



S. 61

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

32258

Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299727